



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ**

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**VLASTNOSTI A CHARAKTERISTIKA  
MAGNETOREOLOGICKÝCH ELASTOMERŮ A PĚN**

PROPERTIES AND BEHAVIOR OF MAGNETORHEOLOGICAL ELASTOMERS AND FOAMS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Roman Zedník

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Jakub Roupec, Ph.D.

BRNO 2017



## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Roman Zedník**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Jakub Roupec, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Vlastnosti a charakteristika magnetoreologických elastomerů a pěn**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Magnetoreologické elastomery a pěny lze s výhodou použít jako pružné elementy s nastavitelnou tuhostí pomocí generovaného magnetického pole, čímž lze měnit rezonanční frekvenci systému. MR elastomery a pěny se používají např. k vibroizolaci budov při seismické aktivitě, útlumu přenosu vibrací ze spalovacího motoru auta do karosérie, atd. V posledních 5 letech dosáhly magnetoreologické pěny a elastomery velkého technologického pokroku, který je zapotřebí zmapovat a vyhodnotit.

Typ práce: rešeršně syntetická

**Cíle bakalářské práce:**

Hlavním cílem práce je rešerše magnetoreologických elastomerů a pěn pomocí odborných článků a literatury. Rešerše musí obsahovat příklady použití těchto prvků, principy řízení, postup výroby a hodnoty možných útlumů včetně změny provozních frekvencí.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- popis výroby MR elastomerů a pěn včetně velikosti a typu použitých železných částic,
- popis použití MR elastomerů a pěn a analýza přínosu v těchto aplikacích,
- popis řízení MR elastomerů a pěn včetně doby odezvy, velikosti a tvaru magnetického obvodu,
- analýza a výběr vhodného typu MR elastomeru pro případ útlumu standu pro hodnocení vibrací pračky.

Požadované výstupy: publikace, průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2017.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf)

**Seznam doporučené literatury:**

KALLIO, Marke. The elastic and damping properties of magnetorheological elastomers. Espoo: VTT, 2005. ISBN 9513866394.

CARLSON, J. David a Mark R. JOLLY. MR fluid, foam and elastomer devices. Mechatronics. 2000, roč. 10, č. 4, s. 555–569. ISSN 09574158.

JOLLY, Mark R, J David CARLSON a Beth C MUÑOZ. A model of the behaviour of magnetorheological materials. Smart Materials and Structures. 1999, roč. 5, č. 5, s. 607–614. ISSN 0964-1726.

DAVIS, L. C. Model of magnetorheological elastomers. Journal of Applied Physics. 1999, roč. 85, č. 6, s. 3348–3351. ISSN 00218979.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl,  
Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický,  
Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce poskytuje dosavadní přehled o magnetoreologických pěnách a elastomerech. Byla zde podrobně rozebrána struktura jednotlivých druhů pěn a elastomerů a vysvětleny různé modely chování, na základě kterých jsou zařízení s těmito materiály zkonstruována. Dále byly probrány možnosti regulace a způsoby vedení magnetického toku a také vyzdvihnuty nejdůležitější mikroskopické i makroskopické vlastnosti. Práce také zmiňuje nejnovější způsoby výroby těchto materiálů. V poslední řadě byly navrženy způsoby využití MR pěn a elastomerů a bylo řečeno, který z materiálů je pro určitou funkci vhodnější.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Magnetoreologické kapaliny, pěny, elastomery, tlumení, absorpce, tuhost, smykový modul, přírodní frekvence, magnetická indukce

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis provides a current overview of magnetorheological foams and elastomers. The structure of individual types of foams and elastomers was discussed here. Various operation modes which are essential for constructing of devices with these materials were explained. Further regulation options and ways of magnetic induction conduction were discussed. And most important microscopic and macroscopic properties were highlighted. Latest ways of production of these materials are mentioned here. Lastly methods of use of MR foams and elastomers were proposed and above that which of the materials is most appropriate for certain application was said.

## **KEY WORDS**

Magnetorheological fluids, foams, elastomers, damping, absorption, stiffness, shear modulus, natural frequency, magnetic induction

---



**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ZEDNÍK, R. *Vlastnosti a charakteristika magnetoreologických elastomerů a pěn*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jakub Roupec, Ph.D.

---





## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práci Ing. Jakubovi Roupcevi, Ph.D. za odborné rady, podnětné připomínky a za poskytnutí základních zdrojů pro vypracování práce. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu při studiu.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, s uvedením všech použitých literárních zdrojů, pod odborným vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Jakubem Roupcem, Ph.D..

V Brně dne.....

.....  
Roman Zedník

---



**OBSAH**

---

<b>1 ÚVOD</b>	<b>12</b>
<b>2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>13</b>
<b>3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>14</b>
3.1 Magnetoreologické kapaliny	14
3.2 Magnetoreologické pěny	18
3.2.1 Použití	18
3.2.2 Struktura	20
3.2.3 Model chování	22
3.2.4 Vlastnosti	23
3.2.5 Možnosti regulace	24
3.2.6 Výroba	26
3.3. Magnetoreologické elastomery	27
3.3.1 Použití	27
3.3.2 Struktura	31
3.3.3 Model chování	33
3.3.4 Vlastnosti	35
3.3.5 Možnosti regulace	38
3.3.6 Výroba	41
<b>4 DISKUZE</b>	<b>45</b>
<b>5 ZÁVĚR</b>	<b>46</b>
<b>6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>47</b>
<b>7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>54</b>
7.1 Seznam použitých symbolů a veličin	54
7.2 Seznam použitých zkratk	54
<b>8 SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>55</b>
<b>9 SEZNAM TABULEK</b>	<b>56</b>

## 1 ÚVOD

Magnetoreologické materiály jsou druh inteligentních materiálu, jejichž reologické vlastnosti můžeme rychle a opakovaně nastavovat na základě externího magnetického pole [1]. Inteligentní materiály měnící svoje fyzikální a chemické vlastnosti na základě vnějších vlivů můžeme vhodně použít pro vytvoření zařízení ovládané právě magnetickým polem.

MR materiály se skládají z magnetických částic o velikosti mikrometrů, které jsou rozmístěny v nemagnetické matici. Jejich nastavení závisí na magnetické orientaci každé částice, a proto nejvhodnějšího nastavení dosáhneme různou intenzitou externího magnetického pole. Výhodou je to, že jejich vlastnosti můžeme nastavovat v krátké časové odezvě, a proto se pro tyto materiály nachází stále nové možnosti uplatnění.

U MR kapalin jsou volně rozmístěny magnetické částice. Ty se nachází v nemagnetické kapalině, ve které mohou vykonávat pohyb. Vytvořením magnetického pole v okolí kapaliny začínají vznikat interakce mezi magnetickými dipóly železných částic v materiálu, což způsobí, že se vytvoří sloupcová struktura, čímž se zvýší zdánlivá viskozita kapaliny. To vede k dobře kontrolovatelnému průtoku na základě zmenšování smykového tření.

Proto jsou MR kapaliny využívány pro zařízení určené pro přenos točivého momentu nebo k pohlcování vibrací a jsou komerčně využívány v automobilovém průmyslu, stavebnictví, leteckém a astronomickém průmyslu a v posilovacích, nebo rehabilitačních přístrojích [1, 2].

MR pěny se dají rozdělit na skupinu suchých pěn s magnetickými částicemi uzavřenými uvnitř pevné struktury a skupinu zčásti nasáklých pěn feromagnetickou kapalinou. Díky rozdílům ve své struktuře mají odlišné makroskopické a mikroskopické chování pod účinkem magnetického pole. Feromagnetické částice, které při vystavení magnetickému poli začnou utvářet lineární strukturu, se chovají stejně jako u MR kapalin [3].

Hlavní uplatnění mají MR pěny v kombinaci s MR kapalinami jako tlumiče nárazů a vibrací, nebo zvukové pohlcovače; výhodou těchto zařízení je mimo jiné značná úspora MR kapaliny [1, 2].

Polem ovlivnitelné MR elastomery se dají z části považovat za pevnou formu MR kapalin. MR efekt vzniká na základě podobných fyzikálních principů jako MR kapalin. MRE jsou tvořeny malými magnetickými částicemi, které jsou rozmístěny v polymerním prostředí. Rozdíl mezi těmito dvěma materiály je v jejich způsobu fungování. MR elastomery fungují v přednastaveném režimu, který spočívá ve vytvoření řetězců částic, které jsou zafixované ve svých polohách, tudíž jejich tuhost je předem částečně určena na základě zvoleného modulu jejich působení. Zatímco u MR kapalin se řetězce vytvoří až při vytvoření magnetického pole při aplikaci magnetického pole [1].

Díky nastavitelné tuhosti u MRE se dají využít jako vibrační absorbéry, izolátory a mnohé další přístroje určené pro zmenšení chvění a nárazů [4, 5].

Je třeba mít na paměti, že všechny vlastnosti těchto materiálů zcela nejsou prozkoumány, a proto se můžeme setkávat s novými možnostmi uplatnění ve zcela různých oborech. Zvláště v ČR nejsme s touto problematikou příliš obeznámeni, a proto je cílem této práce získání nových podkladů pro pracoviště v rámci seznámení se se strukturou, vlastnostmi, využitím a výrobou těchto materiálů.

## 2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Díky stále se zvětšující pozornosti ve výzkumu magnetoreologických pěn a elastomerů ve světě vzniká snaha o zahájení výzkumu těchto materiálů i na našich pracovištích. Pro lepší práci s těmito materiály je vhodné nejprve provést podrobný přehled nejmodernějších experimentů a vlastností v tomto odvětví.

Kvůli lepšímu pochopení principu chování magnetoreologických pěn a elastomerů jsou na začátku rešerše uvedeny klíčové znaky MR kapalin, které navíc poslouží pro porovnání vlastností nových materiálů s kapalinami.

MR pěny se nejčastěji používají v kombinaci s MRK, kdy struktura polyuretanových a v poslední době kovových pěn slouží pro uchycení MRK v jejich pórovité struktuře, což vede k úspoře MRK. V tomto směru bylo docíleno značného zdokonalení v odstranění přebytečných součástí pro utěsnění kapaliny v přístroji, jelikož pěny s tuhou strukturou můžeme snadněji umístit na efektivní polohy v přístrojích. Zakotvením magnetických částic zamezíme degradaci kapalin a životnost přístrojů je zvýšena. Tyto vlastnosti vykazují také MRE, které navíc svojí houževnatější strukturou lépe odolávají povrchovému poškození.

Výroba pěn a elastomerů je složitější, protože magnetické částice musíme umístit do nosných maticí. Proces máčení pěn komerčními MRK se dá považovat za nejdělsí (až 100 hodin), lepší je stlačovací metoda a v poslední době je nejvýhodnější příprava kovových pěn. Takto vyrobené struktury obsahují homogenně rozprostřené částice o velikosti  $3,8 - 5 \mu\text{m}$  s pórovitostí pěn  $100-550 \mu\text{m}$ . Výroba MRE se dá považovat za nejsložitější, je třeba mnoha chemických a termální úprav, neznamená to však, že je nutně nejdělsí. Pohybuje se v řádu 1 hodiny až několika dní. Částice o velikosti  $1-100 \mu\text{m}$  jsou buď homogenně rozprostřené, nebo seřazené ve struktuře. Ve všech materiálech se nejčastěji používají částice čistého železa s různým procentuálním zastoupením, nejlépe nastavitelné jsou však při zastoupení 30 hm%.

Pro dosažení optimálních výkonů operují zařízení s MR materiály na základě definovaných módů. Rozdíl MRK a MRP je však takový, že kapalina se při MR efektu začne vylučovat z pěny a tím uzavírat pracovní prostor, čímž vytváří zčásti smykový model. U MRE jsou operativní módy rozdílné. Pracují v tzv. pre-yield regime (nastavitelná tuhost), oproti MRK pracujících v post-yield regime (nastavitelné tlumení) a mohou být využity v aplikacích s více stupni volnosti. Jejich sílu charakterizujeme na základě polem ovlivnitelného smykového modulu.

Nejvhodnější nastavení materiálů je silou magnetické indukce (většinou do 2 T) nebo druhem a uspořádáním magnetů kolem cívek. Maximální síla pole je závislá na saturaci částic a regulujeme ji velikostí elektrického proudu, u něhož měníme jeho hodnotu a frekvenci většinou v rozsahu od 35–50 Hz při 0 A do 70–90 Hz při konečné velikosti proudu v rozsahu 1,5–3 A.

MR pěny se nejčastěji používají pro absorbování hluku, protože tlumí zvuk v rozsahu frekvencí až do 6500 Hz. U tlumičů se tlumicí vlastnost zvětšuje s rostoucím magnetickým polem, čímž se ale zároveň zvýší i jejich smykový spád a tím se pěnám mění jejich mez kluzu. Ovšem MRE, s jejich přirozenou tlumicí vlastností, se využívají hlavně pro izolaci přírodní frekvence. Jsou schopny automatického nastavení tlumicí frekvence a tím zvýšení výkonu tlumení. MRE vzorek se při aplikaci magnetického pole může prodloužit až o 50 % své délky, tím vyvolá odpovídající změnu ve smykovém nebo tahově-tlakovém modulu, který může dosahovat hodnot v závislosti na protažení průměrně do 2,58 MPa. Na základě těchto hodnot jsme schopni určit tuhost systému a tím stanovit tlumení.

### 3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

#### 3.1 Magnetoreologické kapaliny

U MR kapalin je třeba rozlišit jejich chování v neaktivovaném a aktivovaném stavu. V neaktivovaném stavu, kdy medium není ovlivněno magnetickým polem, se struktura chová na základě typických reologických vlastností a dá se částečně popsat modelem newtonské kapaliny, jejíž chování popisuje rovnice (1) jako chování ideálně viskózní kapaliny.

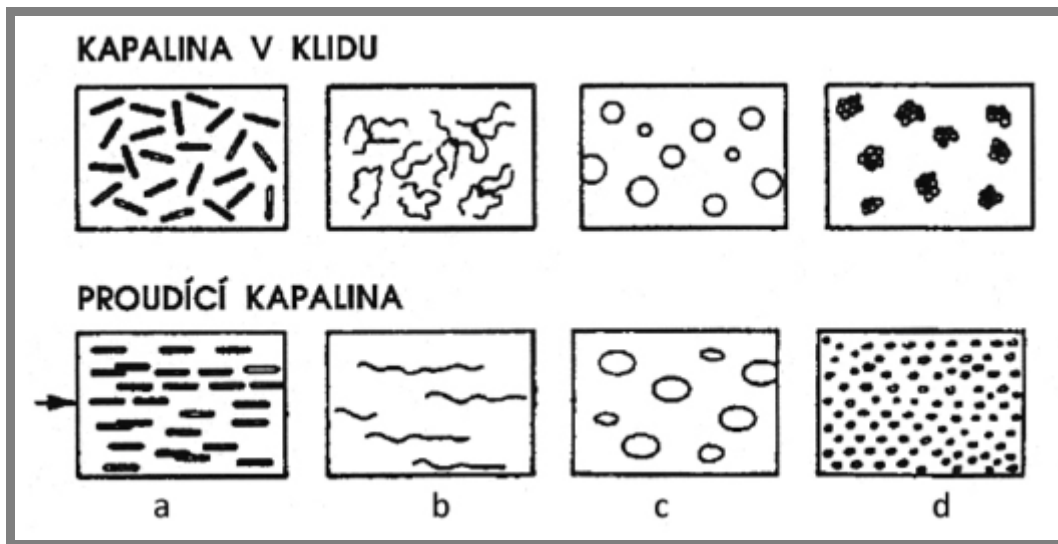
$$\tau = \eta \frac{du}{dx} = \eta \cdot D \quad (1)$$

Kde:

$\eta$       Pa·s    - je dynamický viskozita  
 $D$       -        - gradient rychlosti  
 $\tau$       Pa·s    - tečné napětí

Dynamická viskozita je konstanta u newtonských kapalin, jejíž hodnota s rostoucím tlakem stoupá a rostoucí teplotou klesá. Nejdůležitější prvek z hlediska MR kapalin je gradient rychlosti, což můžeme chápat jako rychlost deformace, smyku, nebo smykový spád. Těmito vlastnostmi často popisujeme chování i u nenewtonských kapalin.

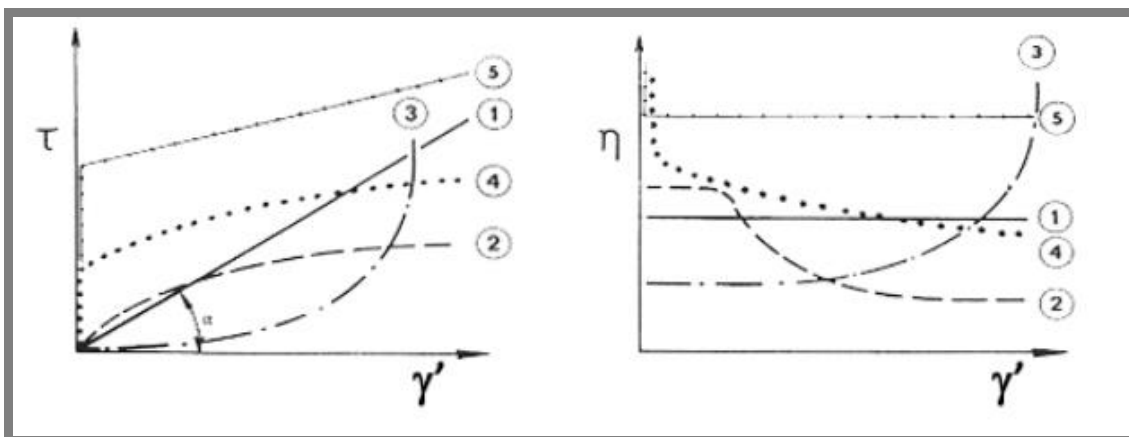
Nenewtonské kapaliny jsou složitější svým vnitřním složením a nedají se popsat Newtonovým zákonem, jelikož  $\eta$  je nadále tzv. zdánlivá viskozita, která je závislá právě na smykovém napětí a spádu. Viskozita u těchto kapalin ovlivněna na základě například těchto jevů na Obr. 1.



Obr. 1 Vliv toku na uspořádání částic a) orientace b) napřímení c) deformace d) rozmělnění [23]

Jelikož dynamická viskozita není vhodná veličina pro popsání chování, nahradíme ji tokovou křivkou.

Newtonovská kapalina může být rozdělena do několika základních typů. V případě MR kapalin jsou nejdůležitější pseudoplastické kapaliny, u kterých zdánlivá viskozita klesá s rostoucím smykovým spádem. Závislost smykového napětí  $\tau$  a zdánlivé viskozity  $\eta$  na smykovém spádu  $\gamma'$  je znázorněna na Obr. 2.



**Obr. 2** Tokové a viskózní charakteristiky 1- newtonovská kapalina; 2- strukturně viskózní kapalina; 3- dilatantní kapalina; 4- pseudoplastická kapalina; 5- binghamská kapalina [23]

Nárůst meze kluzu je hlavní podstata MR efektu. V literatuře se chování těchto kapalin často označuje jako viskoplastické a dá se popsat binghamským modelem na základě rovnice (2).

$$\tau = \tau_y + \eta \cdot \gamma', \tau > \tau_y \quad (2)$$

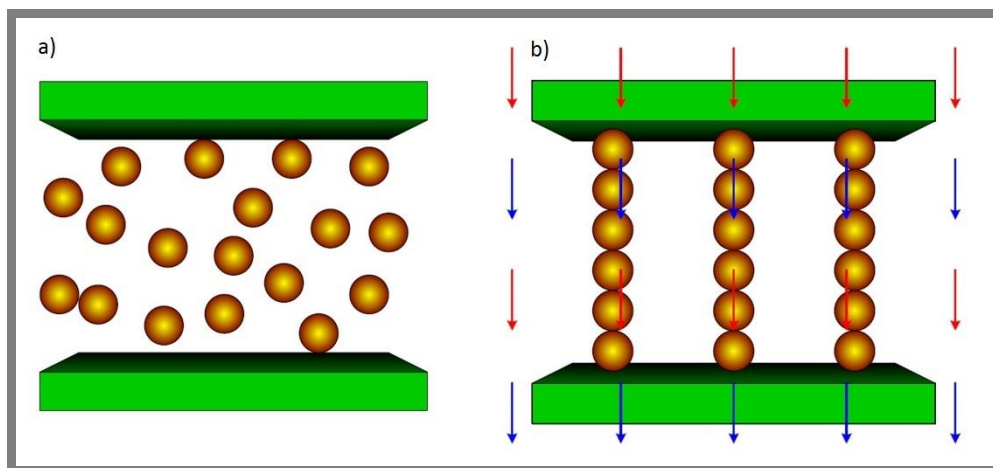
Kde:

$\eta$	Pa·s	- je dynamický viskozita
$\tau$	Pa·s	- tečné napětí
$\gamma'$	-	- smykový spád

Ve volném stavu jsou částice homogenně rozprostřené v nosné kapalině, po aktivaci magnetickým polem začnou feromagnetické částice vytvářet řetězce podél siločar magnetického pole, čímž brání kapalině v průtoku a vytváří tak tužší strukturu. Chování je znázorněno na Obr. 3.

Kvůli možnosti regulace se začaly MR kapaliny využívat v různých zařízeních, která fungují na poměrně rozdílných principech, kvůli kterým byly vytvořeny módy ovládání MR kapalin. Módy jsou vyobrazeny na Obr. 4.

MR kapaliny jsou využívány v zařízeních určené pro přenos točivého momentu nebo k pohlcování vibrací a jsou komerčně využívány v automobilovém průmyslu jako například primární a sekundární tlumiče [6, 7], silentbloky [8, 9], nebo brzdy a spojky [10]. Dále pro útlum vibrací ve stavebnictví [11], v posilovacích a rehabilitačních přístrojích [12] a v neposlední řadě našly své uplatnění v astronomickém a leteckém průmyslu.

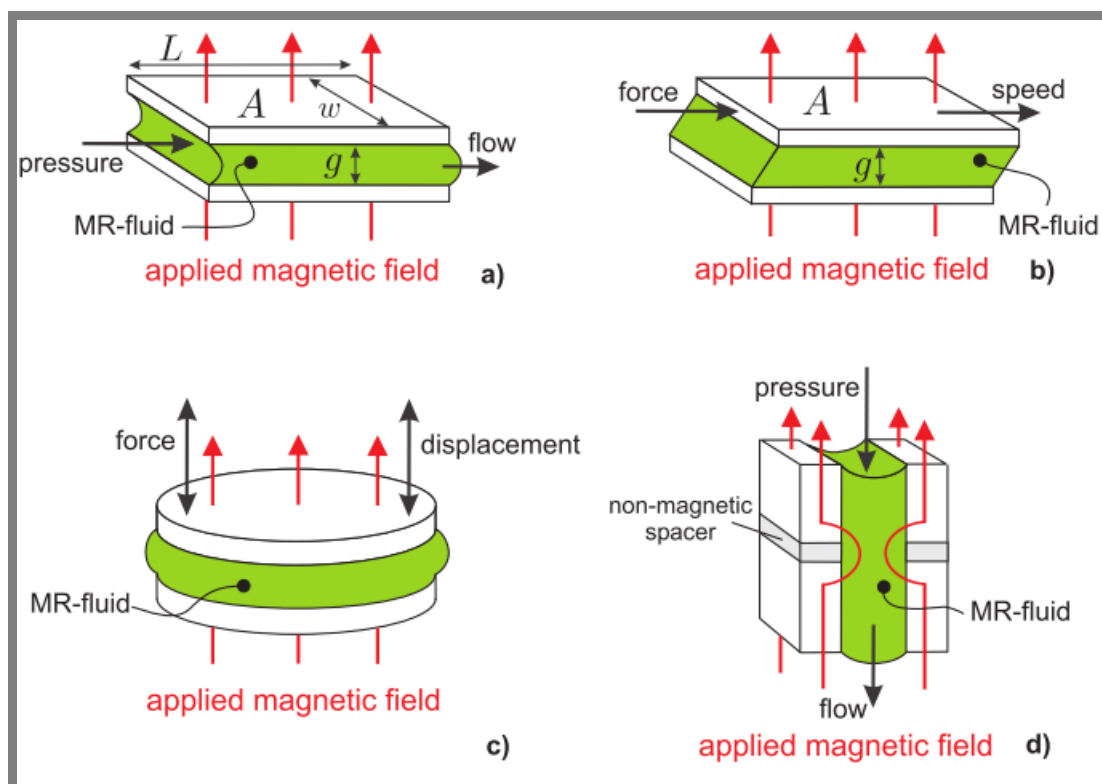


Obr. 3 Zformování plniva a) před aktivací b) plně zmagnetizování [11]

Módy MR kapalin můžeme rozdělit na:

- a) Ventilový (valve mode) – MR kapalina protéká mezi dvěma rovnoběžnými deskami, kterými kolmo ve směru toku kapaliny prochází magnetické siločáry. Seřazením vnitřních částí do sloupcovité struktury se zmenší, případně zastaví průtok kapaliny a mechanismus pracuje jako tzv. ventil, čímž se zvýší celková tuhost, kterou můžeme regulovat silou magnetického pole. Je to princip nazývaný se semi-aktivní regulace. Tento mód se používá nejčastěji, především jako MR tlumič.
- b) Smykový (direct shear mode) – MR kapalina protéká mezi dvěma rovnoběžně umístěnými deskami, na jednu z desek působí boční síla, čímž se desky vůči sobě pohybují a působí smykové napětí. Kolmo k toku MR kapaliny prochází magnetické siločáry a vytváří v kapalině mez kluzu. Míra síly k překonání této meze je daná intenzitou magnetického pole a složením kapaliny. Prakticky se můžeme setkat s tímto módem např. u brzd, nebo spojek.
- c) Stlačovací; tahově/tlakový (squeeze mode) – patří k nejméně používaným módům. MR kapalina a magnetické pole působí stejně jako v předešlých módech, působící síla přibližuje obě desky k sobě, čímž ztenčí vrstvu MR kapaliny. Míra posunutí desky závisí na tuhosti kapaliny, podle nastavení magnetického pole. Amplitudy vychýlení bývají zpravidla v řádu milimetrů, z čehož plyne velká odporová síla kapaliny. Nejvíce užívaný způsob uplatnění je jako tlumič vibrací s malou amplitudou.
- d) Svírací (pinch mode) – jeden z novějších módů u kapalin. Magnetické pole směřuje paralelně s tokem MR kapaliny a v místě, kde je vložena nemagnetická vložka, se rázně změní jeho tok. Funkce spočívá v zhuštění kapaliny kolem stěn, čímž se změní efektivní průměr pro proudění.





Obr. 4 Základní operativní módy MR kapalin a) ventilový, b) smykový, c) stlačovací (tahově-tlakový), d) svírací [11]

Běžně vykazují MR kapaliny dynamickou mez kluzu do 50 kPa při magnetickém poli o síle 150-250 kA/m [13]. Viskozita u kapalin, které nejsou pod účinkem magnetického pole, bývá zpravidla 0,1 - 1,0 Pa·s při 25°C. Pevnost je závislá na saturaci částic magnetickým polem a dosahuje maximální hodnoty dynamické meze kluzu zpravidla až 100kPa. Provozní teplota se pohybuje v rozmezí od -40°C až do +150°C, přičemž ovlivňuje primárně těkavost nosné tekutiny, než polarizaci částic [1]. Přehled typických vlastností MR kapalin je uveden v Tabulka 1.

Tabulka 1 Typické vlastnosti MR kapalin

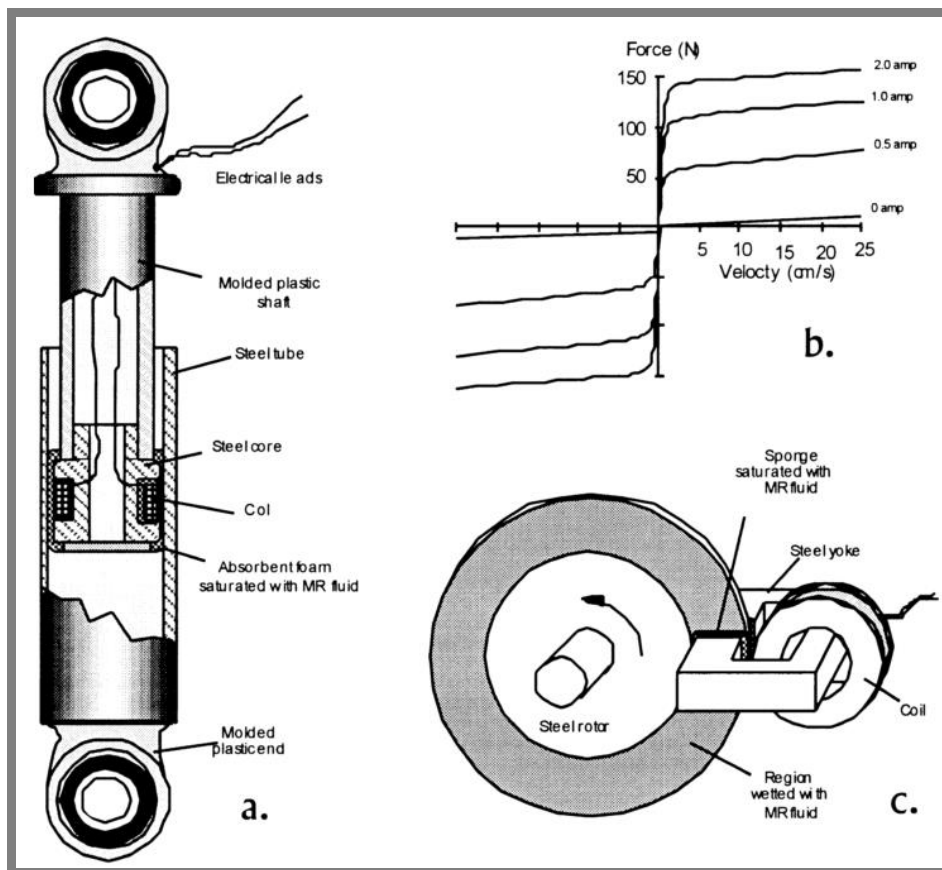
Vlastnosti	Typický hodnota
Maximální síla zatížení, $\tau_y$	50–100 kPa
Maximální síla magnetického pole	~250 kA/m
Plastická viskozita, $\eta_p$	0,1-1 Pa·s
Rozsah operativní teploty	-40 až 150 °C
Stabilita	nenáchylné vůči kontaminaci
Reakční doba	<milisekunda
Hustota	3 až 4 g/cm <sup>3</sup>
Hodnota schopného provozu, $\eta_p/\tau_y^2 (pole)$	10 <sup>-10</sup> –10 <sup>-11</sup> s/Pa
Maximální energetická hustota	0,1 J/cm <sup>3</sup>
Spotřeba energie	2 – 2,5 V @ 1–2 A (2–50 watt)

## 3.2 Magnetoreologické pěny

### 3.2.1 Použití

MR pěno-kapalinové přístroje obsahují MR kapalinu, která je kapilárně držena v obalu tvořeném například ze žinky, pórovitými i hladkými pěny, plstěmi nebo látkami. Nejmoderněji se můžeme setkat s využitím kovových pěn [14].

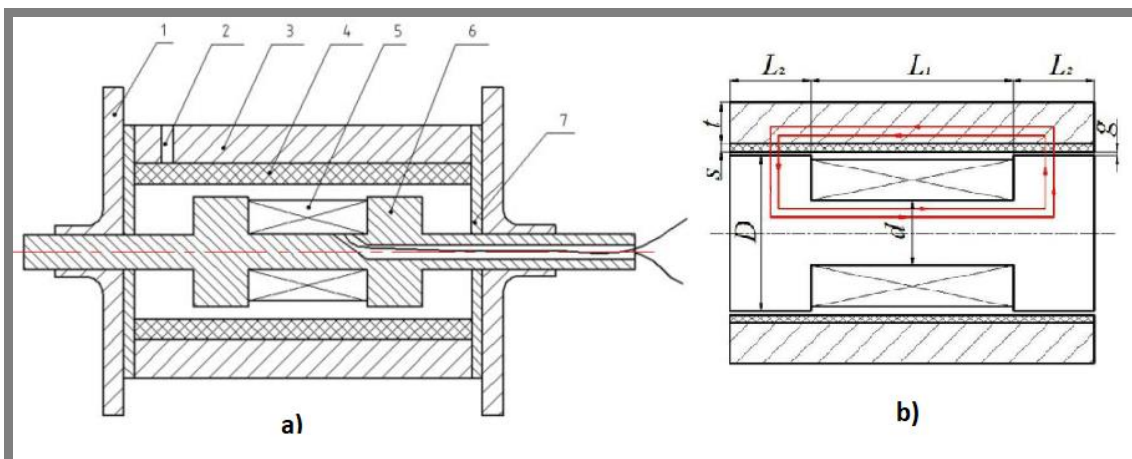
Hlavní příčina užívání MR pěn je odstranění přebytečných součástí pro utěsnění kapaliny v přístroji jako jsou například těsnící gumové a ocelové kroužky, nebo odstranění nutnosti použití přesných výrobních tolerancí a dosažení hladkých struktur povrchu. Při využití u tlumičů se nejčastěji používají polyuretanové pěny s otevřenými buňkami nasáklé MR kapalinou. Další výhodou použití pěn je velká úspora MR kapaliny, například v tlumiči níže byly použity pouze 3ml MR kapaliny. Tato pěna je vložena do ocelového válce, obklopí cívku z ocelového válce a měděného drátu, čímž dohromady vytvoří píst, který je schopen volného axiálního pohybu. Schéma tohoto lineárního kapalino-pěnového tlumiče je na Obr. 5 a).



Obr. 5 Nízkonákladové MR pěnové zařízení [1]

Stejně jako u kapalin se setkáme s MR pěny i u brzdových mechanismů, např. na Obr. 5 c), kde je vyobrazena jednoduchá konstrukce kotoučové brzdy. Na rozdíl od mechanismu pouze s MR kapalinou, kde je využito složitějšího uzavření kapaliny okolo rotorové části, je zde umístěna MR pěnová žínka na póly jednoduchého kovového osazení s cívkou. Brzdy s dostatečně velkou plochou kontaktu mezi MR žínkou a rotující částí umožňují vysokou ovladatelnost točivého momentu. Při použití úzkých brzdových destiček není potřeba vysoce magnetického materiálu, nebo jako další možnost mohou být použity kruhové magnetické výseče na destičce.

Ve snaze o zvýšení životnosti u pěnových MR tlumičů se v roce 2011 objevil článek Lia a jeho týmu [15], ve kterém byl prozkoumán výkon a vztah mezi pórovitostí a permeabilitou kovových pěn. Na základě tohoto článku bylo navrženo použití kovových pěn namísto používaných PU pěn. Další výhody kovových pěn se dále prozkoumaly ve článku [16]. To vedlo až k sestrojení tlumiče s kovovou pěnou, schéma tohoto tlumiče a vyobrazení magnetického působení je na Obr. 6. Je sestaven z podobných částí jako tlumič s PU pěnou, ovšem vyniká několika výhodami, jako jsou dobrá odolnost proti abrazi, lepší kontrolovatelnost tlumicí síly, větší spolehlivost a další.



**Obr. 6** a) Schéma MR tlumiče s kovovou pěnou a MR kapalinou, 1) víko, 2) díra, 3) uzavírající válec, 4) kovová pěna naplněná MR kapalinou, 5) měděné vinutí, 6) ocelový válec, 7) měděné těsnění; b) magnetický okruh [29]

Další možností uplatnění MR pěn je v pohlcování hluku. První myšlenka tohoto použití byla uvedena v článku od Scarpa [2] roku 2004, kde se věnoval různým vlastnostem u pěn se záporným Poissonovým číslem. Později roku 2010 došlo k výzkumu na pěnách s kladným Poissonovým číslem [3], kde bylo zjištěno, že pro absorbování zvuku se zdají být vhodnější pěny s měkčím materiálem s duální pórovitostí oproti tužším pěnám s homogenní strukturou, některé jsou vyobrazeny na Obr. 7.



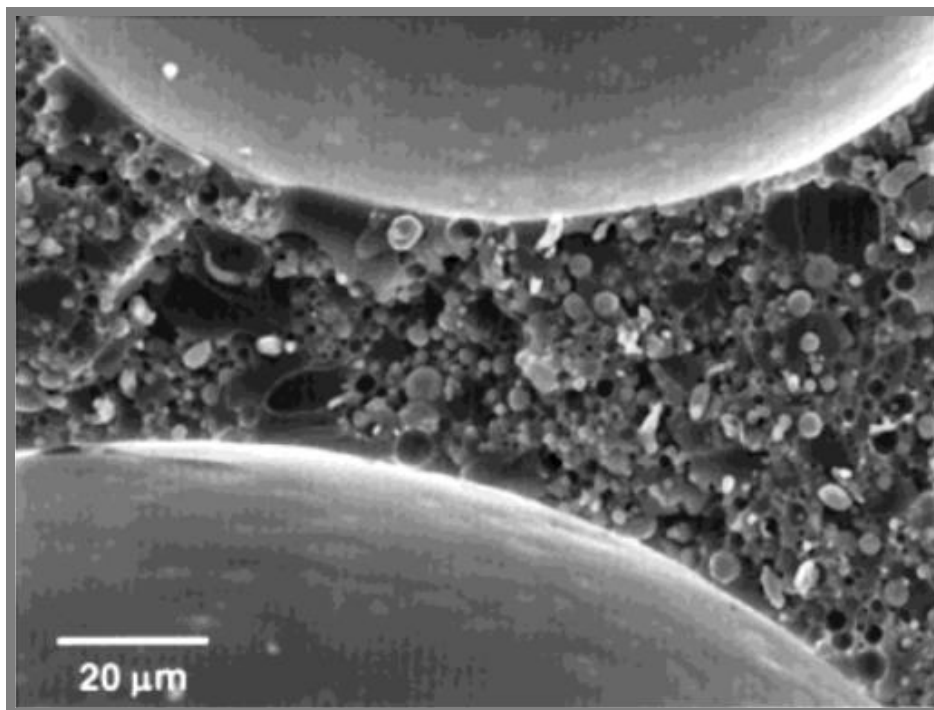
**Obr. 7** Ukázka nenasáklých pěn (po stranách), nasáklých uprostřed, s homogenní strukturou (napravo), s nehomogenní strukturou (nalevo) [4]

V roce 2016 Kim [17] zveřejnil článek o využití MR pěn pro lékařské účely. Jednalo se o zařízení pro přesnější navigaci a elegantnější ovládání robotů provádějících operace. Díky tomuto hmatovému prvku jsou lékaři schopni efektivně rozeznat rozdíl mezi tvrdou a měkkou tkání. Dále může být robot využíván jako cvičný virtuální simulátor pro doktorské studium. Výzkum se nadále plánuje rozšířit o zdokonalenou verzi MR pěnového článku složeného z několika různých struktur pěn pro dosažení rozmanitějších dotykových pocitů.

---

### 3.2.2 Struktura

Rozlišujeme dvě hlavní skupiny MR pěn. První jsou suché pěny s uchycenými částicemi uvnitř struktury a pěny nasáklé MR kapalinou. Nasáknutí je pouze částečné, protože kapalina je držena kapilárními silami v pórech pěn, a tím přispívá k úspoře MR kapaliny. Rozprostření magnetických částic ovlivní chování pěn různých materiálů. Nejčastěji to bývají polyuretanové pěny a v poslední době kovové pěny obvykle z niklu, mědi, hliníku nebo železa. Strukturu pěn zobrazuje Obr. 8.



**Obr. 8** Vzorek pěny (0,29 g/cm<sup>3</sup>) obsahující 30 hm % částic Al, vysoká koncentrace je rozmístěna náhodně [4]

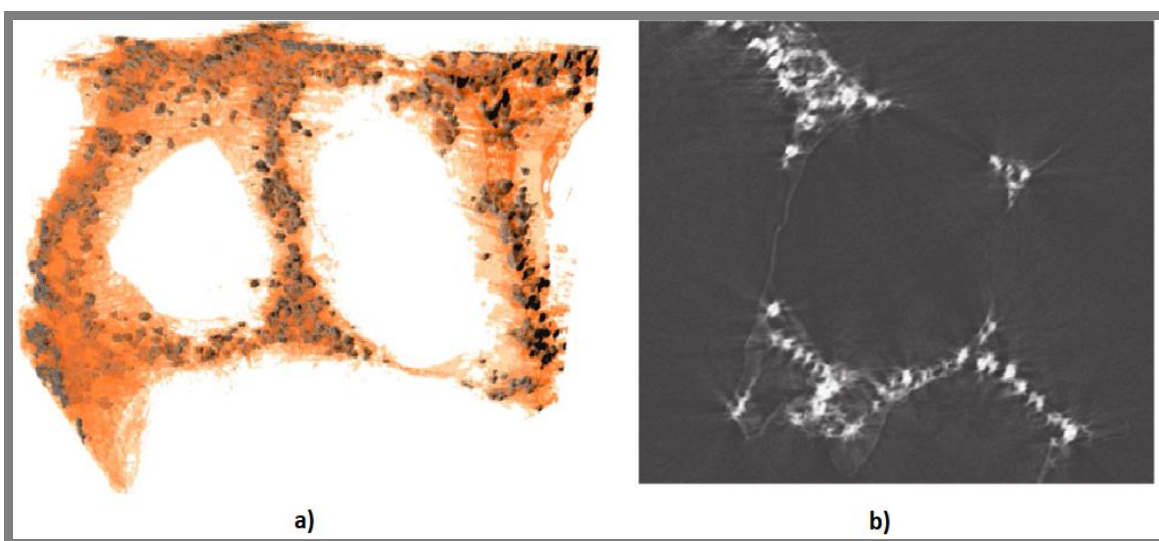
Díky použití mikrotomografie ve článku [18] byla prozkoumána struktura PU pěn s obsahem ocelových částic o velikosti 3,8-5  $\mu\text{m}$ . Na základě těchto dat je možné říct, že rozdělení pórů uvnitř pěn se dá popsat principem Weibullova rozdělení. Pro výpočet tohoto rozdělení byla použita rovnice (3).

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x'}\right)^n}; x', n > 0 \quad (3)$$

Kde:

$x'$  - velikostní parametr  
 $n$  - parametr tvaru

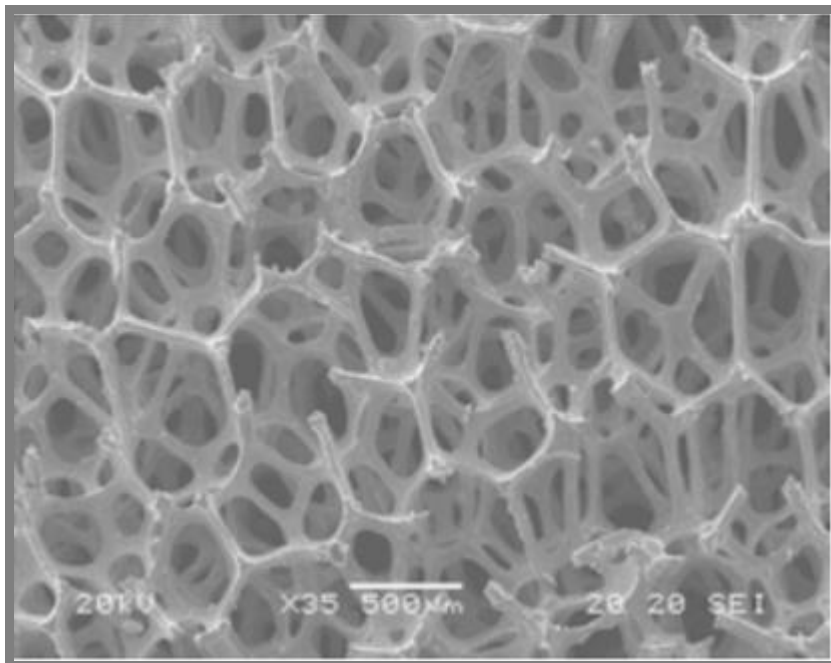
Bylo zjištěno, že přidání částic do pěny zapříčiní zmenšení tvarového parametru rozdělení, což finálně znemožní tvorbu malých pórů ve struktuře. Tento efekt se dá vysvětlit na základě známých mechanismů, které nastávají při stabilizaci pěn, konkrétně se jedná o zpoždění při vysušení kvůli ucpání hranic jednotlivých plošek kovovými mikročásticemi. Tento jev ve výsledku zpomalí spojení malých pórů s velkými. Právě na základě pravděpodobnosti spojování dvou zrn bylo vhodné použít Weibullovo pravděpodobnostní rozdělení. K tomuto efektu lze dále říci, že při velké koncentraci částic dostáváme strukturu o malém počtu velkých plošek, to může být způsobeno porušením struktury pěny, kvůli přidání velkého počtu částic. Tento závěr je potvrzen vypořádáním velkých dutin ve struktuře pěny s velkým obsahem částic, který se lišil od pěn s menším zastoupením částic a tím jemnější struktúrou.



**Obr. 9** 3D rekonstrukce tří sousedních dutin; membrány mezi menšími dutinami nejdou vidět kvůli extrémně malé šířce; b) řez z tomografického snímku a); lze vidět nedostatek částic v membránách dutin [33]



Podle způsobu výroby kovových pěn uvedených níže má struktura charakter otevřených železných pórů s velikostí od 100  $\mu\text{m}$  do 550  $\mu\text{m}$ . Velikost pórů by měla být větší než velikost kovových částic, které vykonávají pohyb a tím vyvolávají MR efekt. Kdyby tato podmínka nebyla splněna, mohlo by dojít k ucpání pórů a nesprávné funkci zařízení. Příklad kovové struktury je uveden na Obr. 10.



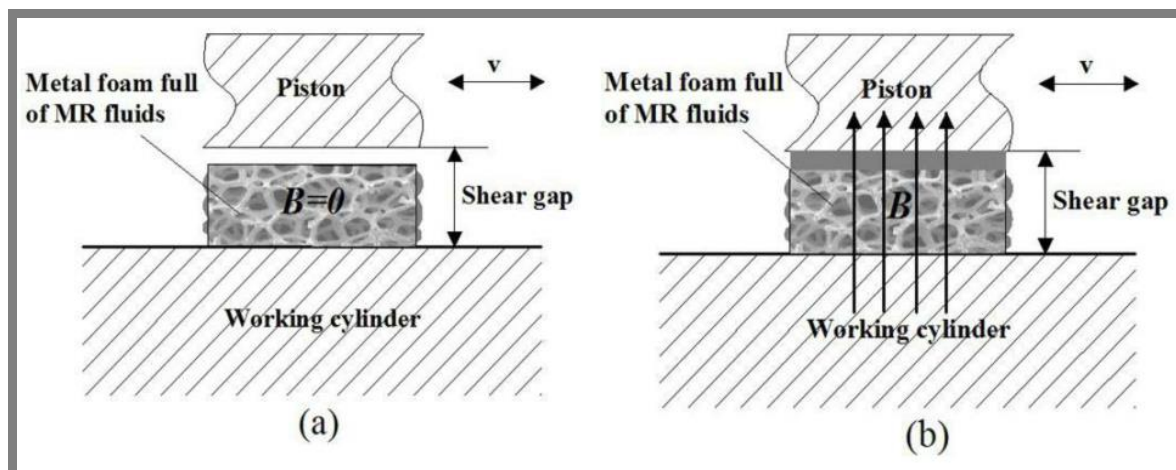
Obr. 10 Struktura kovových pěn [30]

---

### 3.2.3 Model chování

Protože MR pěna působí na kapalinu uvnitř smykovým módem, je efektivita tlumiče dána množstvím aktivní nasáklé pěny. Tlumiče z těchto materiálů vykazují delší životnost než tlumiče pouze s MR kapalinou. Většina zatížení je přenášena strukturou uchycených železných částic a nastává pouze málo opotřebení pěn v důsledku kontaktu jejich měkké struktury s osazením v přístroji. Navíc opotřebení pěny nemá v důsledku dopad na změnu funkce přístroje, protože pěny bývají stlačeny až na 70 %, čímž je mezera stále vyplněna.

Pro zvětšení životnosti se do popředí dostávají kovové pěny [14]. Mají větší tvrdost a mimo jiné se u těchto materiálů daleko lépe kontroluje jejich relativní permeabilita. U tlumičů založených na tomto principu je MR kapalina uložena v kovových pěnách a po vytvoření magnetického pole se kapalina začne z pěny vylučovat a uzavírat mezeru určenou pro vytvoření smykového tření mezi MR médiem a válcem, čímž vzniká magnetoreologický efekt podobný smykovému módu u tlumičů pouze s MR kapalinou. Princip tohoto fungování je zobrazen na Obr. 11.



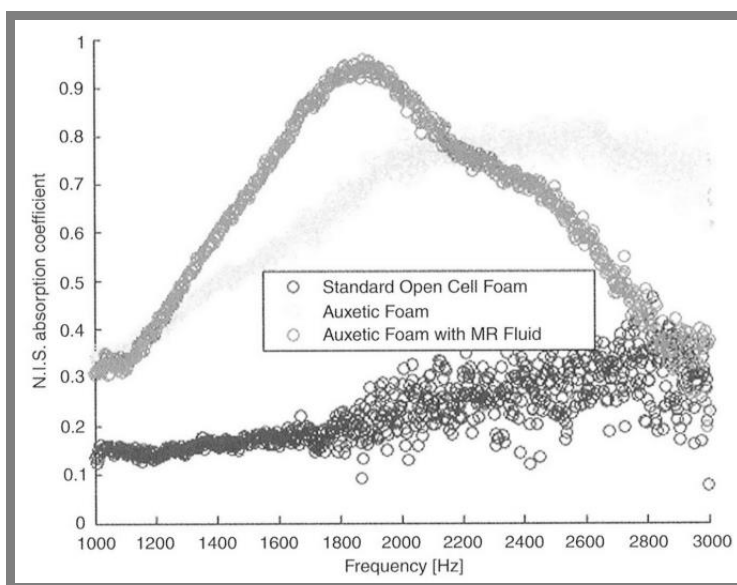
Obr. 11 Princip fungování MR kovových pěn a) magnetické pole je vypnuté; b) magnetické pole je zapnuté [29]

### 3.2.4 Vlastnosti

3.2.4

Výhodou pěnových zařízení je jejich velká robustnost, čímž při neaktivovaném stavu vykazují velmi malé zatížení. Naopak při aktivovaném stavu mají vysoký rozsah dynamického útlumu, který je patrný z Obr. 5 b). Proto jsou MR pěny vhodné pro aplikace s malým až středním zatížením, a navíc díky nasávkové schopnosti pěn nedochází k degradaci kapaliny, jako je například provozní houstnutí.

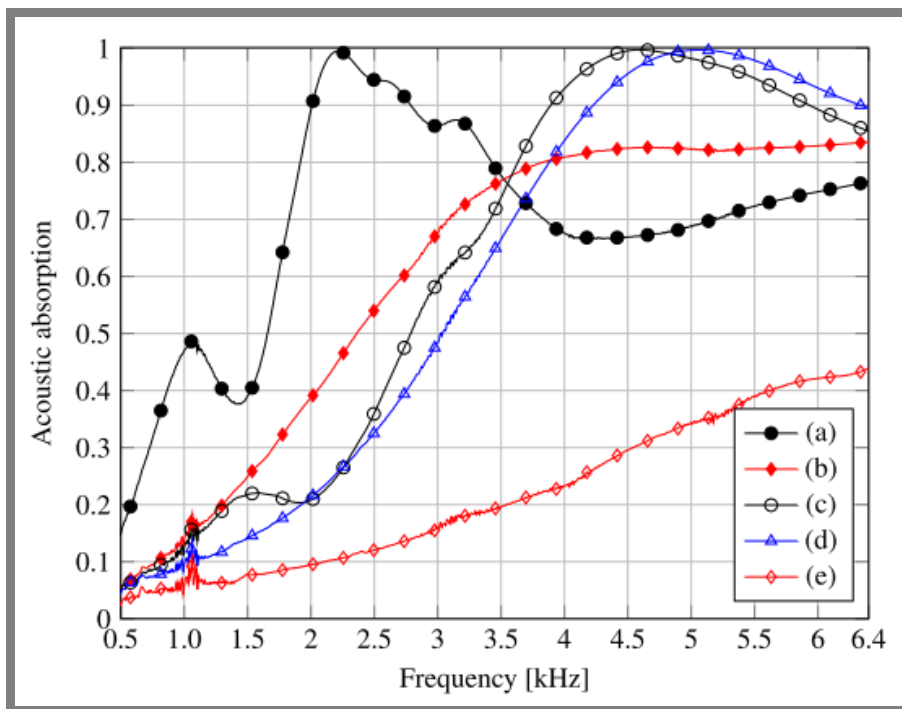
Při aplikacích pro útlum zvuku se používají i pěny z auxetických<sup>1</sup> materiálů. Mají lepší schopnost absorbovat hluk než normální pěny a jejich efektivita útlumu se zvyšuje, pokud jsou nasáklé MR kapalinou, což je patrné z Obr. 12. Pěny v aktivovaném stavu mají výrazně lepší absorpční schopnosti při vyšších frekvencích zvuku, oproti neaktivovaným pěnám.



Obr. 12 Porovnání v útlumu hluku standardní pěny s nasáklou a suchou pěnou se záporným Poissonovým číslem [5]

<sup>1</sup> se záporným Poissonovým číslem

Co se týče útlumu u konvenčních pěn, vlastnosti u tuhých pěn se při aktivaci nijak zásadně neodliší. Patrné rozdíly lze vidět u pěn s homogenní strukturou, konkrétně u měkčích nenasáklých pěn pozorujeme největší útlum při nízkých frekvencích. Největší útlum při vyšších frekvencích je u pěn nasáklých MR kapalinou, kde nastává posun v oblasti útlumu oproti čistým pěnám přibližně o 400–500 Hz. Změny jsou patrné z Obr. 13.

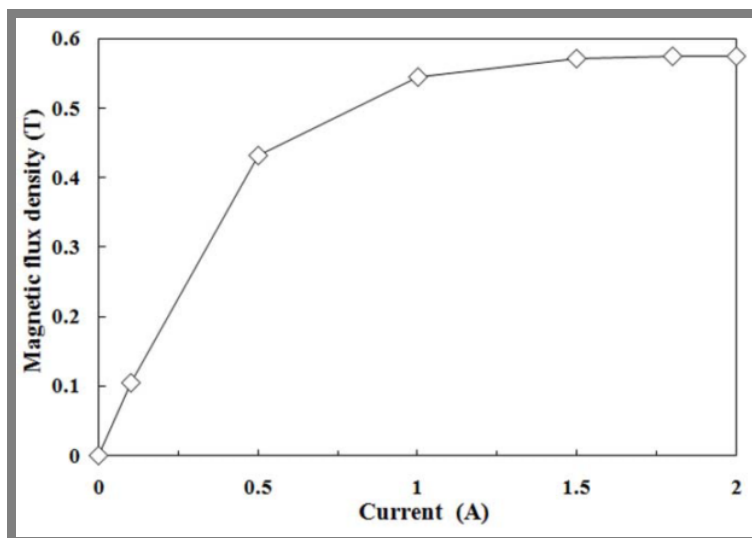


Obr. 13 Akustická absorpce polyuretanových pěn s homogenní mikroskopickou strukturou; (a) čistý vzorek, 16 mm široký; (b) nasáklý vzorek v aktivovaném stavu, 16 mm široký; (c) čistý vzorek, 7 mm široký; (d) nasáklý vzorek v neaktivovaném stavu, 7 mm široký; (e)

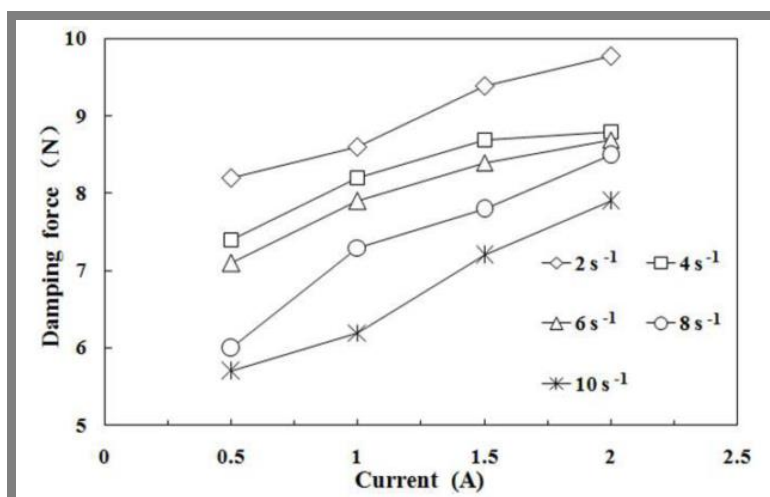
### 3.2.5 Možnosti regulace

Můžeme říct, že zvyšování proudu má zásadní dopad na změnu smykového spádu jak u kovových, tak PU pěn. S větším proudem roste i intenzita magnetického pole (Obr. 15) a tím nastává v zařízení i větší útlum vibrací, a to až do hodnoty 1,5 A, kdy částice začínají dosahovat své maximální saturace, což je vyobrazeno na Obr. 14. V tomto stádiu se vlastnosti mění už jen nepatrně. Nutno podotknout, že tlumící síla klesá se zvětšujícím se smykovým spádem, jak je možno vidět na Obr. 16, čímž se materiálu zvyšuje jeho celková tuhost. Tento jev je daný mírou vyloučení částic MR kapaliny z prostředí pěny a má hluboký dopad na mez kluzu tlumiče.

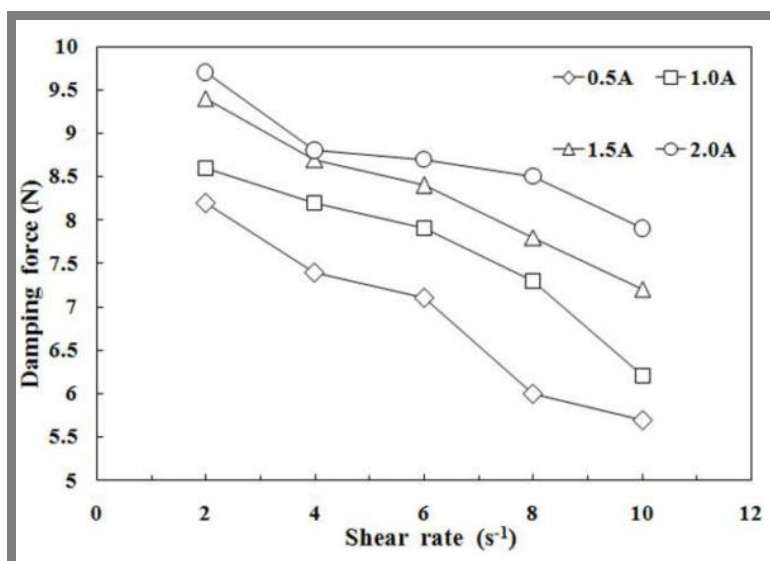




Obr. 14 Závislost změny intenzity magnetického pole na zvětšujícím se proudu [29]



Obr. 15 Závislost tlumicí síly na proudu pro vzorky s rozdílným smykovým spádem [29]



Obr. 16 Závislost tlumicí síly na smykovém spádu při různém proudu [29]

V experimentu [14] byla na cívku postupně přivedena skupina proudů. Hodnota proudu nabývala od 0,5 do 2 A s přírůstkem po 0,5 A. Mezitím se měnil i smykový spád z hodnoty 2 do 10 s<sup>-1</sup> s přírůstkem po 2 s<sup>-1</sup>. Mezi jednotlivými měřeními po uvedených krocích proběhli 5minutové intervaly, to hlavně kvůli tomu, aby se MR kapalina uchytila opět ve struktuře kovové pěny. Regulaci lze provádět i použitím různých druhů magnetů (např. neodymových nebo keramických) a vzdáleností jejich umístění.

### 3.2.6 Výroba

Při přípravě vzorků z PU pěn pro akustický útlum nebo tlumení vibrací můžeme použít namáčecí či stlačující metody. Při metodě prostého máčení se nejprve vzorek válcového tvaru vloží například do hliníkové nádoby, kde je radiálně i axiálně stlačen. Forma se následně umístí na 50 minut do trouby o konstantní teplotě 160 °C, čímž se docílí menší pórovitosti pěn pro lepší uchycení MR kapalin. Vzorek se nechá vychladit a je lehce natažen pro zachování cylindrického vzhledu. Následně se máčí v MR kapalině po dobu 100 hodin, čímž se MR kapalina rovnoměrně uchytlí v celé struktuře pěny a 48 hodin se nechá odstát k vyloučení přebytku kapaliny [2]. Pro lepší rozprostření kapaliny se pěna opakovaně máčí a stlačuje, výsledkem je dosažení tenké vrstvy MR kapaliny na pórech pěnového media. Stlačovací proces je dokončen poté, co přestane kapalina vytékat z pórů [3]. Pěny vhodné pro tlumicí aplikace prochází předkompresí, díky čemuž lépe vyplňují oblast jejich umístění, a i přes případnou degradaci materiálu stále efektivně plní svoji funkci.

Proces přípravy kovových pěn je odlišný než příprava obyčejných pěn. Pro zvětšení pórovitosti a smáčivosti se polyuretanová pěna namočí do kyselého roztoku manganistanu draselného, čímž se celkový povrch zdrsni a vzápětí se dezoxiduje v roztoku kyseliny šťavelové. Druhý krok je příprava vodivé vrstvy. Speciální lepidlo s ocelovými částicemi je rozprostřeno na připravenou PU pěnu, čímž se stane vodivá. Dále se PU pěna nasákne do solného roztoku příslušného kovu (nikl, měď, hliník), abychom docílili přeměny na kovový prvek. Termální úpravou se zbavíme PU pěny a zároveň zlepšíme mechanické vlastnosti kovových pěn. Různou pórovitost a tuhost struktury docílíme změnou velikosti proudu nebo změnou formy. Příklad struktury kovové pěny je na Obr. 10. Některé komerčně dostupné MR kapaliny vhodné pro máčení jsou v Tabulka 2.

Tabulka 2 Komerčně dostupné MR kapaliny [19–21]

Kontrolovatelná kapalina	Váhové zastoupení plniva v kapalině, [%]	Viskozita, [Pa·s @ 40 °C]	Hustota, [g/cm <sup>3</sup> ]
<b>MRF-122EG</b>	Fe (~μm), 72	0,042±0,020	2,28
<b>MRF-132DG</b>	Fe (~μm), 80,98	0,112±0,02	2,95-3,15
<b>MRF-140CG</b>	Fe (~μm), 85,44	0,280±0,070	3,54-3,74

### 3.3. Magnetoreologické elastomery

3.3

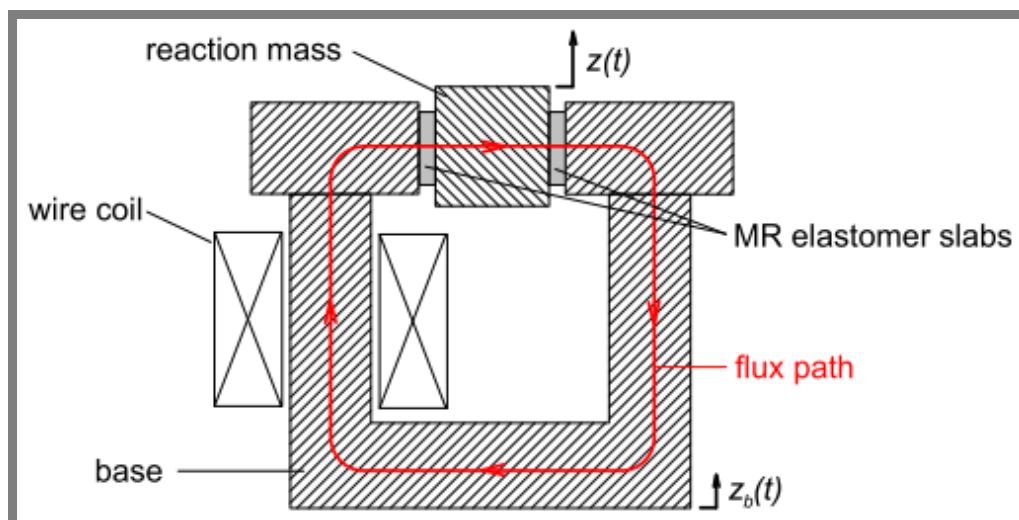
#### 3.3.1 Použití

3.3.1

Přestože výzkum v oblasti MR elastomerů začal už v roce 1985, první model využití MR elastomerů jako nastavitelných tlumičů vibrací byl uveden v práci od Gindera [22]. Počínaje touto prací nastalo zvýšení zájmu v oblasti výzkumu MR elastomerů. Začaly vznikat práce, ve kterých byla prozkoumána struktura materiálu [1, 7, 23–30], stanoveny základní modely fungování [7, 13, 24, 31–33], navržena nová zařízení a vylepšení jejich způsobu sestavení [1, 4, 5, 22, 34, 35] a následně prozkoumány jejich vlastnosti a výkonnosti [7, 36, 37]. Tato zařízení jsou vhodnými kandidáty pro uplatnění v odvětvích jako je například letectví [38, 39], automobilový průmysl [41, 64, 66], strojírenství nebo stavebnictví [53, 68, 70]. Různé konstrukce zařízení pro útlum vibrací, které obsahují MR elastomery, byly navrženy v podobě vibračních tlumičů [5, 36, 37, 41], vibračních izolátorů [34, 42, 43], adaptivních podstavcových izolátorů [40], silentbloků [42] a vrstvených deskových tlumičů [44, 45]. Nejnovější prototypy těchto i jiných kategorií budou probrány níže. Tyto návrhy by mohly být použity v různých aplikacích např. pro tlumení vibrací v sedadlech, vibroizolaci budov při seismické aktivitě, útlum přenosu vibrací ze spalovacího motoru do karosérie automobilu, adaptivní standy pro útlum vibrací v domácích spotřebičích atd. Dosud se však nesetkáme s plně komerčním využitím MR elastomerů v běžné praxi, jako tomu je u MR kapalin.

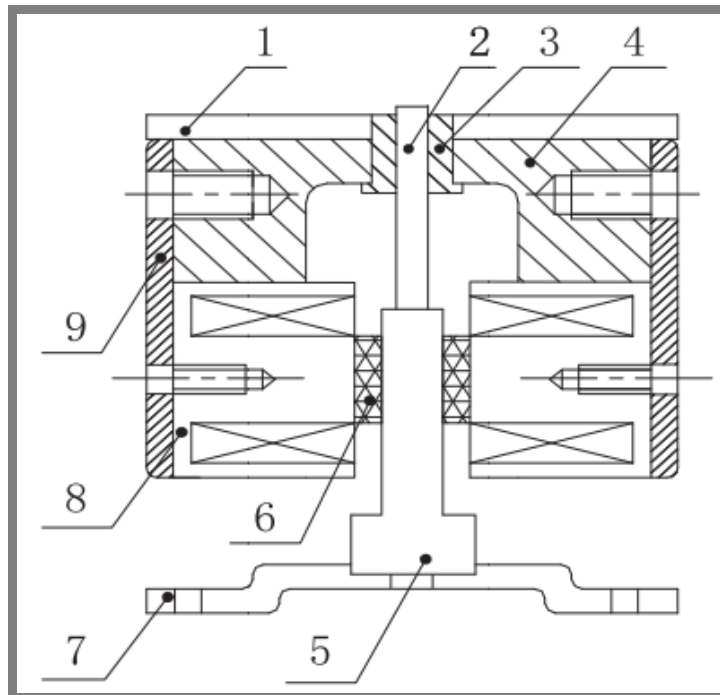
Tlumiče vibrací, nazývané také laditelné tlumiče vibrací, anglicky tuned vibration absorbers (TVA), nebo dynamické tlumiče vibrací (DVA), tlumí nejčastěji rotační nerovnováhy působící na konstrukci například od motorů nebo pump. Nejdůležitější znak těchto tlumičů je ten, že dokáží správně pracovat pouze v určeném rozsahu frekvencí, pokud je tato mez překročena, může dojít k nesprávné funkci, nebo dokonce ke zvětšení vibrací. Proto je pro tyto aplikace vhodné, aby si požadovanou frekvenci nastavovali automaticky (ATVA).

První TVA byl patentován Ginderem [22], fungoval na smykovém módu a byl zkonstruován z uzavřeného magnetického obvodu, jehož konstrukce je patrná z Obr. 17. Tento model byl zdokonalen Dengem [5], který přidal ještě jednu cívku podél magnetického toku.



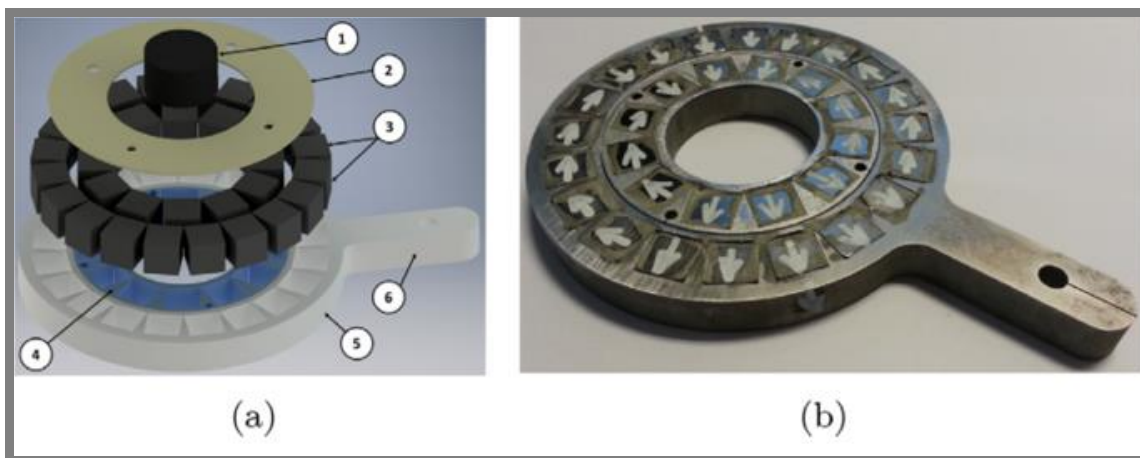
Obr. 17 MR elastomerový TVA navržený výzkumnou laboratoří Ford [34]

Jak se ukázalo, mnohem vhodnější jsou tlumiče ATVA. S prvním tlumičem tohoto typu přišli Zhang a Li [46], zařízení tohoto typu dokázalo vysledovat frekvenci rušivých sil a tím efektivněji tlumit vibrace. Několik dalších zařízení podobného typu, s cílem dosažení větší kompaktnosti, bylo zkonstruováno a to vedlo až k návrhu Denga a Gonga [47] na Obr. 18.



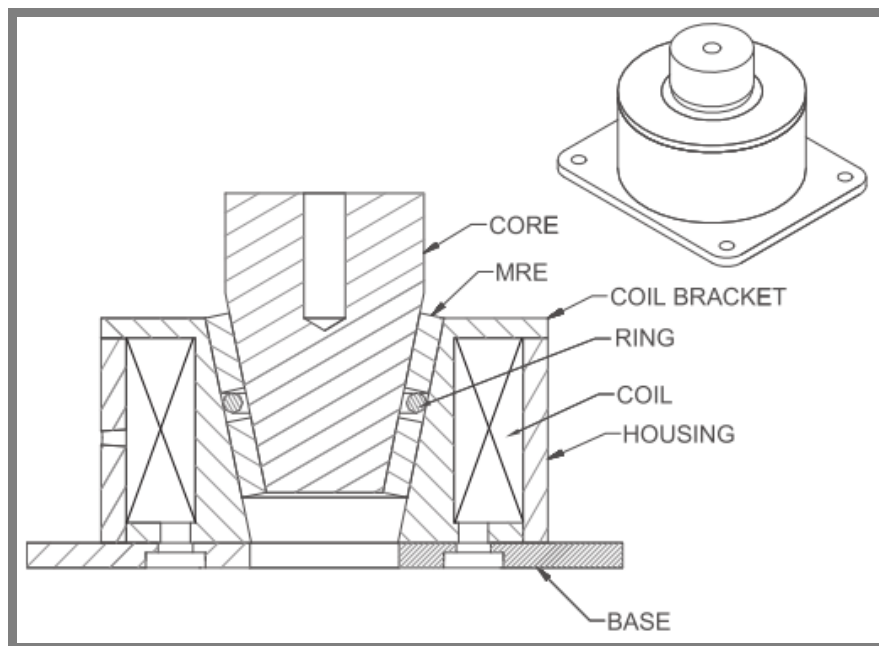
**Obr. 18** Kompaktní MR elastomerový ATVA; 1 - kryt, 2 - vodící tyč, 3 - kluzná ložiska, 4 - magnetický vodič, 5 - deska přenášející smykové napětí, 6 - MR elastomery, 7 - podstavec, 8 - elektromagnet, 9 - skříň pro uchycení [59]

Později se u těchto tlumičů začal objevovat i tahově-tlakový mód [48] a v neposlední řadě i kombinace smykového a tahově-tlakového módu [49], což vedlo k ještě větším tlumícím vlastnostem. Mezi jeden z nejnovějších zařízení patřící do této kategorie se řadí TVA reprezentovaný Bocianem [35]. Zařízení je schopno tlumit nejen vibrace, ale také impulsivní nárazy. Ovladatelnost je zajištěna prostřednictvím permanentních magnetů, nově rozmístěných do Halbachova uspořádání, které je na Obr. 19.



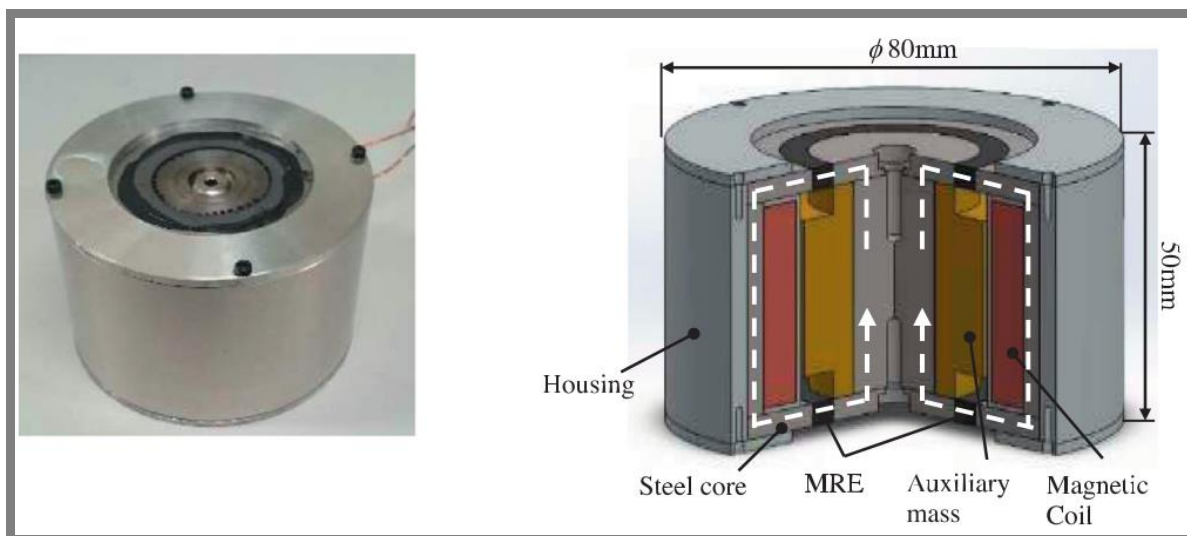
**Obr. 19** Dvojitě dipolární Halbachovo uspořádání; a) vysvětlení součástí: 1) MRE materiál, 2) krytka, 3) neodymové magnety, 4) vnitřní Halbachova řada, 5) vnější Halbachova řada, 6) díra pro kolík umožňující rotaci; b) sestavený objekt [47]

O něco rozdílný způsob fungování mají izolátory vibrací. Kompletní izolaci přístroje zajistíme tak, že izolátor vibrací nainstalujeme mezi přístroj a zdroj vibrace. Obecně bývají rozděleny na izolátory zatížených a nezatížených přístrojů. Izolátory mohou fungovat jak ve vertikální, tak horizontální poloze, většinou při vibracích s jedním stupněm volnosti (SDOF). Nejdříve se objevila práce Gindera [29] s nastavitelným automobilovým odpružením. Výzkum pokračoval i mimo automobilový průmysl, za zmínku stojí například vibrační izolátor od Liaeho [34], nebo plátové tlumiče od Kavlicogleho [42]. Později se objevil izolátor vibrací od Lia a Dua [50] pro sedadla automobilů na Obr. 20, pracující na smykovém a tlakovém módu.



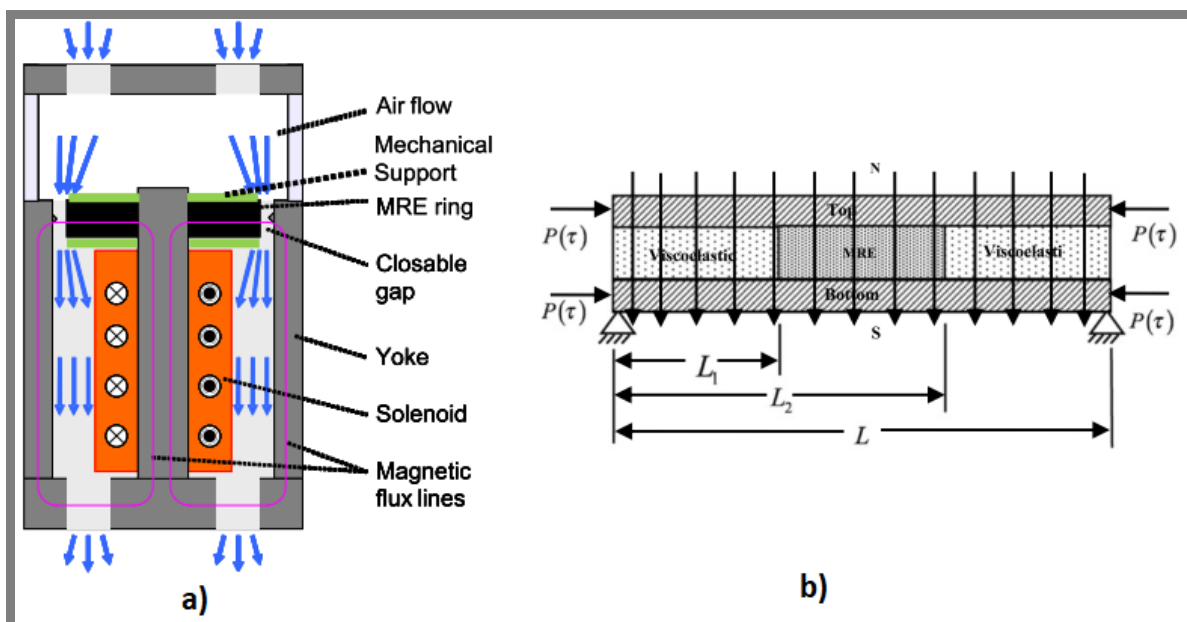
**Obr. 20** Schéma MR elastomerového izolátoru vibrací pro automobilová sedadla [62]

Dále byl vyvinut silentblok na bázi isolačního odpružení pro zmenšení vibrací mezi motorem a karoserií u automobilů [51]. V o něco rozdílné kategorii pro útlum především ve stavebnictví, kdy tlumený objekt bývá většinou nezatížený, se prvotně objevila práce Lia a ostatních [40], který uvedl první laminátový izolátor, jehož největší výhody jsou vysoká kapacita zatížení, vylepšená vodivost zařízení a vhodný design, vyhovující mnoha konfiguracím. Nedávno byl vydán článek od Komatsuzakiho [52] nebo [53] o zdokonalení tohoto zařízení a zároveň pečlivějšímu prozkoumání jeho vlastností. Zařízení je vyobrazeno na Obr. 21.



Obr. 21 Fotografie a schéma široko-frekvenčního tlumičního zařízení [64]

Díky polem ovlivnitelných elastických vlastností jsou MR elastomery vhodné pro uplatnění i ve snímacích zařízeních, jako jsou například silové senzory [54] nebo senzory s obsahem grafitu detekující magnetické pole [55]. Svoje uplatnění mohou najít i v dalších zařízeních širokého spektra, jako jsou vzduchové ventily [56], které regulují proud vzduchu expanzí MR elastomeru v otvoru nebo přístroje v podobě deskových tlumičů (adaptive sandwich beam) [44, 52]. Schémata zobrazuje Obr. 22.



Obr. 22 a) Kontrolovatelný ventil [68], b) deskový tlumič s MRE jako částí jádra [56]



Rozdíly v MR elastomerových zařízeních a MR kapalinových zařízeních se dají shrnout následovně:

1. MR elastomerové zařízení pracují hlavně v režimu před zatížením, zatímco MR kapalinové zařízení v režimu po zatížení, jinak: MR elastomerové zařízení mají hlavně nastavitelnou tuhost, zatímco MR kapalinové zařízení mají hlavně nastavitelné tlumení
2. Operativní módy jsou rozdílné
3. MR elastomerové zařízení mohou pracovat při více stupních volnosti, zatímco MR kapalinové zařízení sotva při jednom stupni volnosti

### 3.3.2 Struktura

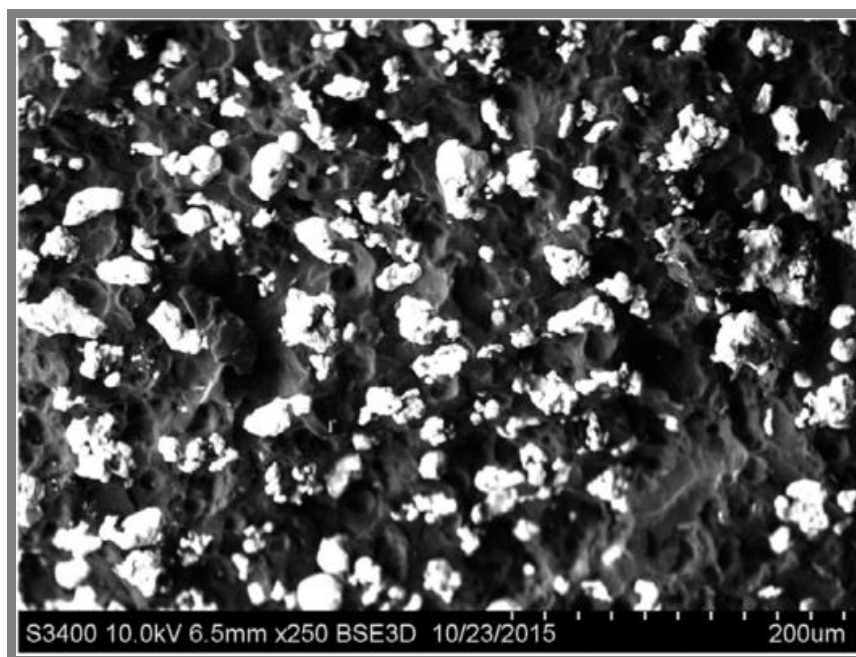
### 3.3.2

---

MR elastomery mohou být složeny ze široké škály nemagnetických kompozitních materiálů makromolekulárních struktur pevného nebo gelového charakteru. V této struktuře se podobně jako u MR kapalin vyskytují magnetické částice, ty mohou být rozprostřeny homogenně, čímž struktura získá izotropní vlastnosti a jejich vlastnosti nejsou závislé na směru. Ovšem, pokud je elastomer vystaven externímu magnetickému poli během vytvrzování nosné struktury, dojde k uspořádání magnetických částic, které po vytvrzení struktury zůstanou uzavřené ve svých sloupcovitých polohách. Tímto budou mít seřazené elastomery velice anizotropní mechanické, elektrické, magnetické a termální vlastnosti [7].

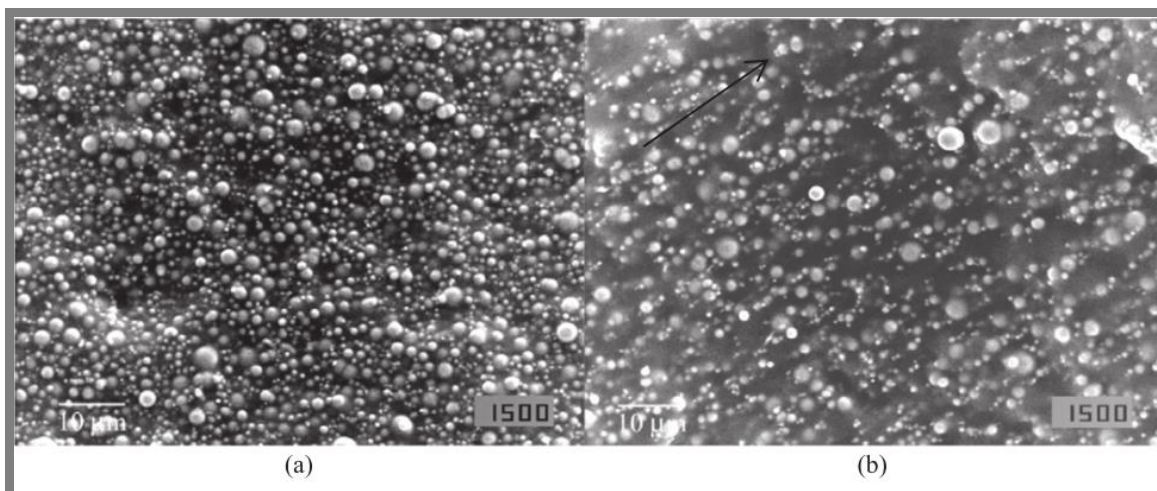
Reakce mezi částicemi plniva s okolním elastomerem probíhají v nanometrickém měřítku. Elastomery jsou velice komplexní polymerovou strukturou, ve které je rozptýleno několik druhů pevných a kapalných látek, které dohromady tvoří matici. Tento materiál má sám o sobě viskoelastický charakter. Interakce mezi plnivem a maticí mohou být různě silné, což ovlivní reologické a mechanické vlastnosti kompositu. S rostoucí koncentrací plniva klesá viskoelastický potenciál elastomeru a struktura se začne podobat spíše kaučukovým sloučeninám, které po přesáhnutí mezní hranice obsahu plniva začnou vykazovat Paynův efekt. Paynův efekt se dá definovat jako pokles fázového smykového modulu v závislosti na rostoucí amplitudě oscilace a zvyšuje se rostoucí koncentrací plniva [30, 57].

Jedním z parametrů jednotlivých buněk, který ovlivňuje chování kompositu, je jejich velikost. Vyztužení struktury se projeví už při velikosti částic menších než 100 nm. Mnohem důležitější parametr rozměru je jejich tvar. Tento parametr také ovlivňuje obalení neboli smáčení jednotlivých částic okolním elastomerem, což je zároveň závislé na rozprostření plniva. Homogenní rozprostření bývá neoptimálnější, jelikož volně se vyskytující aglomeráty mohou iniciovat místa poruch, a to i pokud chceme vytvořit seřazenou strukturu. Ukázku struktury jsme schopni vidět na **Obr. 23**.



Obr. 23 Homogenní struktura vzniklá tlakovým vytlačováním, zvětšení x250 [47]

Typicky se MR elastomery, podobně jako MR kapaliny, skládají ze tří hlavních složek, a to nosného viskoelastického polymeru, magnetických částic (plniva) a viskózních kapalin. Ty bývají nejčastěji silikonový olej, sloužící jako aditivum, které je přimícháváno do polymerní struktury. Matrice MRE mohou být vytvořeny použitím různých druhů kaučuků, jako například přírodní kaučuk, silikonové gumy, pryže nebo syntetické polymery a mnoho dalších materiálů. Matrice by měla mít malou permeabilitu pro lepší uchycení částic. Nejčastěji bývají vyplněné sférickými částicemi většinou ze železa o velikosti jednotek až stovek mikrometrů [58]. Železo má dobrou magnetickou saturaci, vysokou permeabilitu a vykazuje malé zbytkové zmagnetizování. Tyto vlastnosti poskytují silnou, krátkodobou magnetickou přitažlivost částic. Mimo sférického mohou mít částice nugetový, ploškový, nebo jehličkový tvar [7, 58]. Maximální MR efekt ke zvětšení tuhosti materiálu byl dosažen při hmotnostním zastoupení částic ve výšce 30 %, při vyšších koncentracích se vlastnosti při napětí zhoršují. Typická struktura s 30 hm% je na Obr. 24.



Obr. 24 Struktura MR elastomerů s 30 hm% železa a) homogenní struktura; b) seřazená anizotropní struktura, směr šipky ukazuje směr seřazení částic



Výběr vhodné matice elastomeru je důležitý z hlediska aplikace v praxi, kde chceme docílit co nejdelší životnosti materiálu. Výhoda ve struktuře oproti klasickým MR kapalinám je, že nedochází k postupné degradaci díky tomu, že jsou částice pevně ukotvené v tuhé matici. Materiál je navíc celkově tuhý na to, aby odolával povrchovému poškození, se kterým jsme se mohli setkat u MR pěn. Díky pevné formě navíc není potřeba jakýchkoli nádob pro udržení materiálu na požadovaném místě a nehrozí kontaminace struktury cizími látkami [59].

### 3.3.3 Model chování

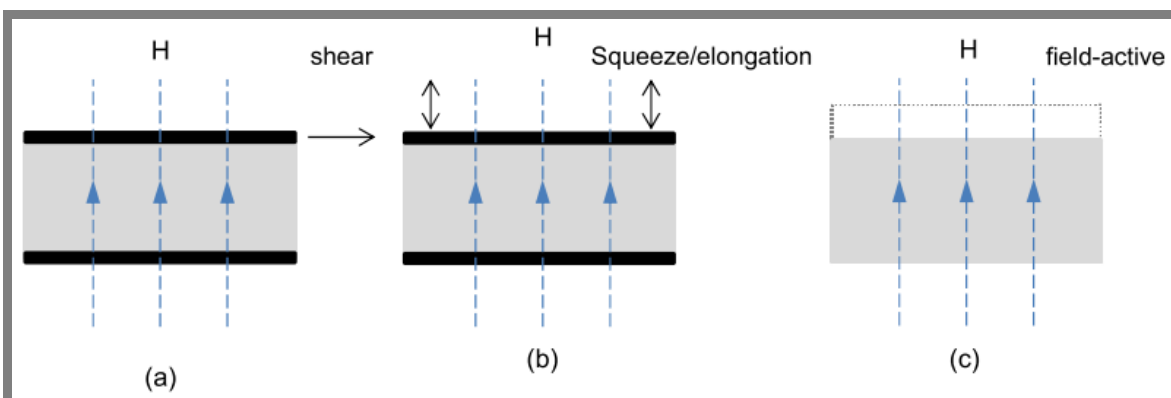
3.3.3

---

Mechanické vlastnosti závislé na struktuře se liší podle toho, jestli je elastomer pod působením magnetického pole, nebo není. Pro popsání chování polymerové struktury bylo vytvořeno několik modelů. Nejdříve se objevil model pro popis heterogenně rozprostřených částic [60], který nebral v potaz silové interakce mezi částicemi, proto vznikla zdokonalená verze, na základě které bylo zjištěno zvýšení interakce mezi částicemi díky úpravě struktury jejich povrchu [28]. Dále Christensen [61] vytvořil třífázový model chování heterogenních struktur. Třetí fáze je v bezprostředním okolí mezi částicí a elastomerem, kde lze zaznamenat jiné vlastnosti než v celkové matici. Z výsledků plyne, že efektivní smykový modul lze zjistit z energie deformace uložené v této suspensi. Modely uvedené výše byly provedeny čistě pro strukturu, která není ovlivněna magnetickým polem.

Vytvoření magnetoreologického efektu u MR elastomerů je poměrně analogické MR kapalinám, ovšem některé rozdílnosti v chování jsou přeci jen patrné. Hlavní rozdíl je v tom, že vytvořené řetězce v elastomeru mají tendenci operovat vždy v režimu před zatížením (pre-yield regime), který nastává při malých amplitudách deformace, zatímco kapaliny fungují v typicky kontinuálním smykovém nebo ventilovém režimu po zatížení (post-yield regime), který nastává při velkých amplitudách deformace. Toto vykazují polymery, které mají jak lineární, tak nelineární viskoelastické chování. Další rozdíl je v charakteristice jejich síly. U MR kapalin jsme jejich sílu charakterizovali na jejich zatížení závislém na magnetickém poli, ale u MR elastomerů charakterizujeme jejich sílu ovlivnitelným smykovým modulem závislým na magnetickém poli (field-dependent shear modulus). Jestli je přivedeno magnetické pole, částice uvnitř se zmagnetizují a vytvoří dipóly uvnitř struktury. Tohle seskupení do sloupců se děje, dokud má elastomer stále malou viskozitu a částice jsou schopné se otáčet a pohybovat podél magnetických siločar. Částice seřazené do takovýchto struktur se z pohledu potřebné magnetické energie vyskytují v nejméně energeticky náročných místech, což znamená, že jsou v těchto místech nejvíce upevněny. Zatížením zhotoveného kompositu v přítomnosti magnetického pole způsobíme dislokaci částic z těchto poloh. S rostoucí silou magnetického pole jsme nuceni vyvinout větší sílu pro uskutečnění deformace, což odpovídá smykovému modulu, který je závislý na magnetickém poli [7, 4, 35]. To lze podobně vysvětlit následovně. Magnetoreologický efekt je definován jako reversibilní změna viskoelastických schopností MR materiálu, který je vystaven magnetickému poli. V případě MR elastomerů je MR efekt vyjádřen jako magneticky indukovaná reversibilní změna v modulu kompositu. Zároveň je změna modulu považovaná za nejvíce patrnou změnu v chování materiálu [7, 4].

I když v některých studiích můžeme najít tvrzení, že se tlumicí vlastnosti elastomeru mění s nastavením magnetického pole, většina tvrzení se spíše přiklání k tomu, že změna v tlumicích vlastnostech je v závislosti na magnetickém poli spíše nepatrná [7, 4, 26, 32, 34, 35, 62]. Většina útlumu pochází ze tření na rozhraní mezi elastomerovou maticí a částicí, tudíž se schopnost útlumu dá posoudit množstvím indukovaného magnetického efektu. Určíme ji na základě poměru mezi zvětšeným modulem  $\Delta G$  při zvětšeném magnetickém poli vůči původnímu (nastřádanému) modulu  $G_0$  při nulovém magnetickém poli. Nastavením síly magnetického pole jsme schopni elegantně ovlivňovat dynamickou tuhost, ať už izotropních, nebo uspořádaných MR elastomerů. U neaktivovaných izotropních elastomerů se dynamická tuhost mění lineárně v závislosti na procentuálním zastoupení částic. Dále se dá zvýšit i zavedením magnetického pole, pokud plnivo přesahuje alespoň 15 hm%. Nejlépe nastavitelné je při hodnotách 27–30 hmotnostního zastoupení částic. U MR elastomerů se kvůli jinému způsobu fungování setkáme s jinými operativními módy, než tomu bylo u MR kapalin. Na rozdíl od kapalin, kde se železné částice mohly pohybovat volně uvnitř nosné tekutiny a tím se zarovnat podél směru magnetických siločar, u MR elastomerů jsou částice pevně uzamčené uvnitř polymerové matice. Externím působením, což může být deformace nebo magnetické pole, se částice mohou jen nepatrně vychýlit ze svých originálních poloh. Proto se vytvořené řetězce nadále nemusí shodovat se směrem magnetických siločar. Ovšem MR elastomery, jakožto měkké elastické materiály s možností aktivace magnetickým polem, jsou deformovatelné podél směru magnetického pole [63]. Právě kvůli těmto vlastnostem byly vytvořeny jiné módy fungování, které jsou na Obr. 25.



Obr. 25 Základní operativní módy MR elastomerů; a) smykový, b) tahově-tlakový, c) polem aktivovaný [74]

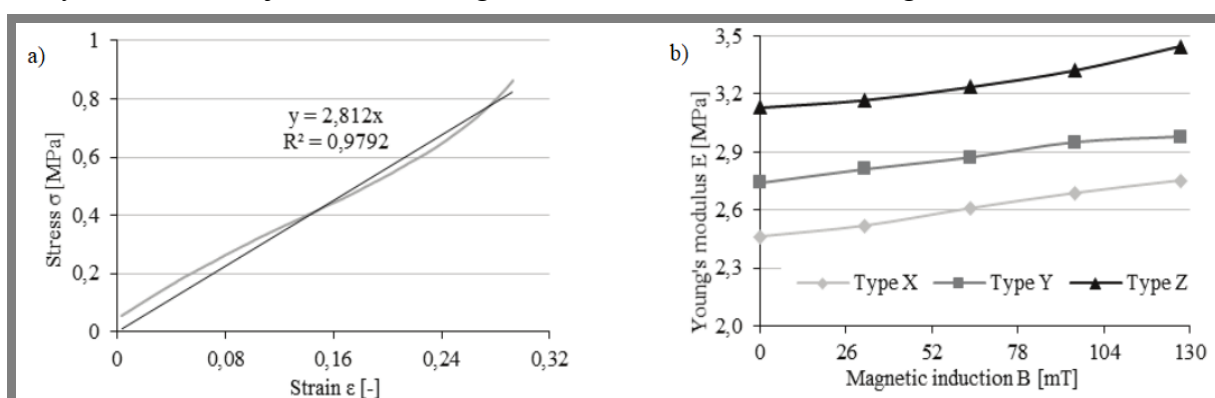
Kvůli pevné struktuře materiálu můžeme říct, že není možné použití ventilového módu, který se běžně vyskytoval u proudících MR kapalin. Nicméně při aktivovaném stavu mohou působením magnetického pole MR elastomery měnit svůj tvar. Tento efekt se nazývá magnetostrikce<sup>2</sup> [64]. Dá se říct, že při smykovém a tahově-tlakovém módu pracují MR elastomery podobně jako MR kapaliny. Módy uvedené výše se mohou vyskytovat v izotropních i anizotropních MR elastomerech. Avšak v aplikacích se budou vyskytovat s různými konfiguracemi, například s různou kombinací směrů magnetického pole nebo různě seřazenými řetězovými strukturami [62].

<sup>2</sup> změna rozměrů materiálu při zmagnetování

### 3.3.4 Vlastnosti

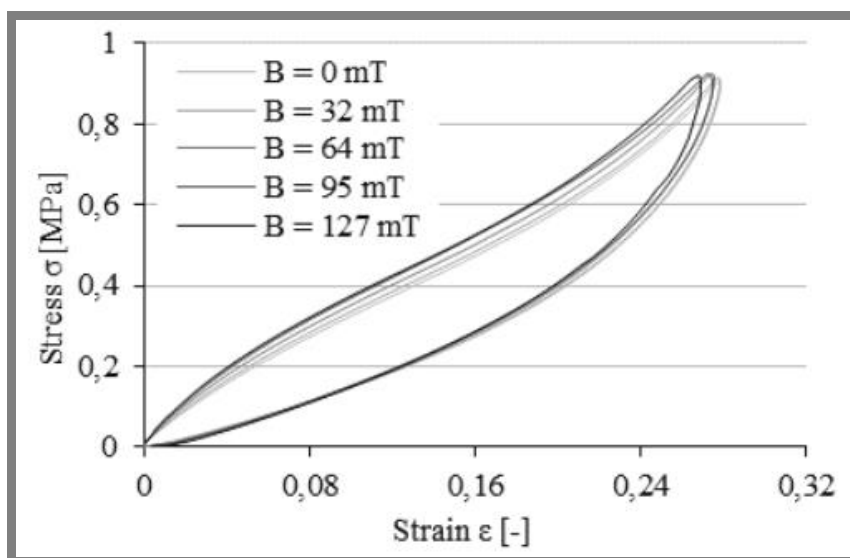
Matematické modely pro popis vlastností MR elastomerů se dají rozdělit do dvou skupin. První z nich se týká jejich mikroskopických procesů popsaných výše. Druhá skupina se zabývá jejich makroskopickým popisem. Ten je postaven na chování materiálu při zatížení. Tyto modely jsou vytvořeny spojením několika vzorků sériově nebo paralelně a představují plastické, elastické a viskózní deformace. Každý model v daném seskupení vykazuje jistou materiálovou konstantu.

Výsledky testů při statickém zatížení vidíme na Obr. 26. Můžeme říct, že výsledky odpovídají Hookovu zákonu do 10 % deformace. Na obrázku vlevo je závislost zatížení na deformaci pro anizotropní vzorek vyrobený při magnetickém poli o síle 100 mT, aproximaci bylo možno vyhodnotit i při 30 % poměrné deformaci. Na obrázku vpravo jsou tři různé vzorky vždy s jinou silou magnetického pole při výrobě, znázorňující závislost magnetické indukce na změně Youngova modulu.



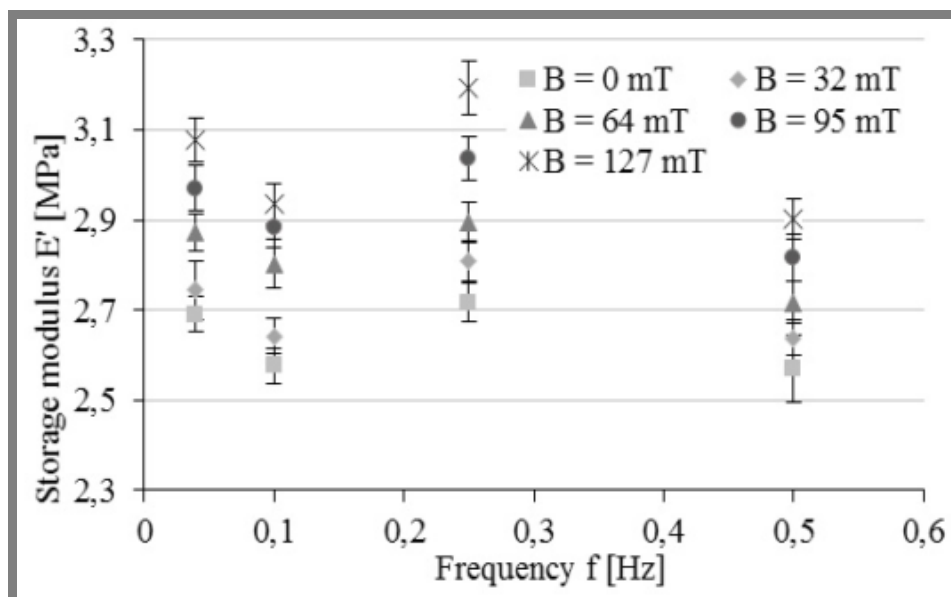
**Obr. 26** Výsledky při statickém zatížení, a) ukázka aproximace anizotropního vzoru při magnetické indukci  $B = 32$  mT, b) Youngův model pro různé vzorky v závislosti na magnetické indukci

Testování při cyklickém zatěžování pro určení závislosti deformace na zatížení je na Obr. 27. Cyklické zatížení probíhalo s frekvencí  $f = 0,04$ -0,5 Hz. Pro předejití chybám se vzorky nechaly před testováním zatížit 50 cykly.

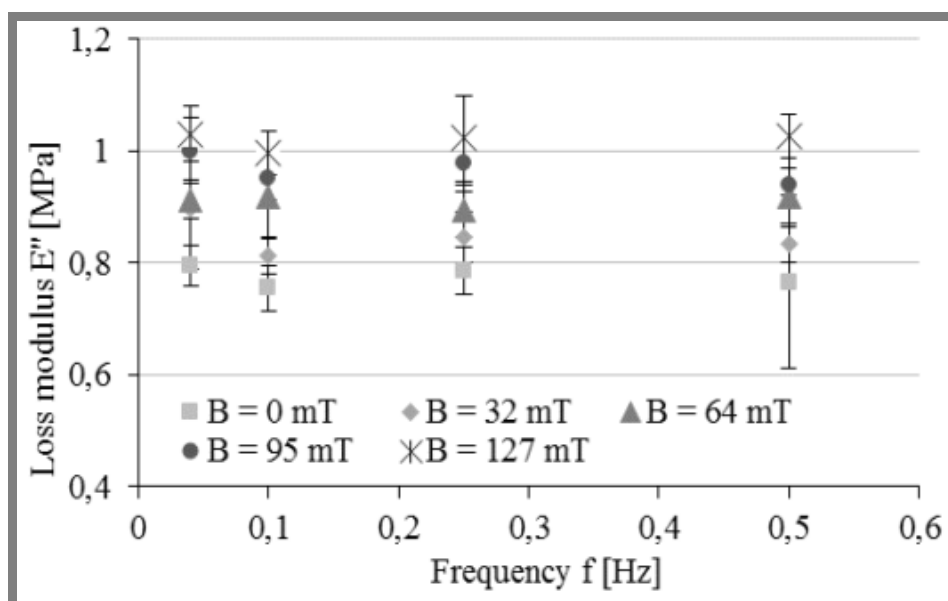


**Obr. 27** Výsledky pro různé magnetické intenzity při cyklickém zatížení s  $f = 0,04$  Hz

Pro určení akumulované energie a možnosti její rozptýlení se obvykle určují parametry původního modulu a poklesu modulu elasticity  $E'$ , nebo viskozity  $E''$ . Tyto závislosti jsou na Obr. 28 a Obr. 29.



Obr. 28 Původní modul v závislosti na budící frekvenci a síle magnetického pole při poměrné deformaci 20 %



Obr. 29 Pokles modulu v závislosti na frekvenci a síle magnetického pole při poměrné deformaci 20 %

Obecně se staly MR elastomery populárními díky jejich unikátním vlastnostem a jejich potenciálu aktivního nebo částečně aktivního tlumení vibrací. Právě útlum vibrací se označuje jako vrozená schopnost tohoto materiálu - to díky jeho velkým změnám v modulu [41] a rychlým odezvám v nastavitelnosti (reakční doba), které jsou ještě menší než u MR kapalin. Další vlastnosti, které je vhodné vyzdvihnout, jsou stabilita, dobrá kompatibilita s mechanickými součástmi a poměrně malá energetická náročnost. Široký rozsah nastavitelnosti modulu MR elastomerů umožňuje efektivnější tlumení vibrací, než tomu bylo u semi-aktivního tlumiče s MR kapalinou [40]. Kromě jejich elastických vlastností závislých na magnetickém poli, MR elastomery, hlavně jejich seřazená forma, vyčnívají několika dalšími zvláštními vlastnostmi jako je magnetoelasticita, magnetorezistance, magnetostrikce, piezorezistence<sup>3</sup> a tepelná odolnost [64]. V Tabulka 3 jsou různé druhy MR elastomerů a jejich vlastnosti z několika různých prací do roku 2017.

**Tabulka 3** Porovnání zjištěných dat výzkumu doposud; A – Materiál matice, B – Typ magnetických částic, C – Velikost částic [μm], D – Zastoupení částic, E – Magnetické pole při výrobě [T], F – Budicí frekvence [Hz], G – Aplikované magnetické pole [T], H – hodnota protažení [%], I – nashromážděný modul  $E'$  [MPa], J – maximální změna v nashromážděném modulu  $\Delta E'$  [MPa] [45]

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Uretanový elastomer	Karbonyl železa	6-9	11,5 %	0,3	10	0,6	10	-	0,75
Silikonová guma	Železný prášek	5	60 hm.	0,5	36	0,15	0,1	0,018	-
PDMS <sup>4</sup>	Prášek oxidu železitého	8,4	3,5 hm.	-	100	-	0,5	0,81	-
Dvousložkový silikon	Prášek oxidu železitého	7-9,5	27 %	0,55-0,57	-	0,56	1	10,1	-
Polyuretan	Karbonyl železa	7-9,5	27 %	0,55-0,61	-	0,7	50	7,24	2,58
Dvousložkový silikon	Karbonyl železa	2-8	70 hm.	1	-	1,8	0,2	1,4	0,35
Polyuretan	Karbonyl železa	6-9	33 %	0,3	0,04	0,13	10	3,9	0,96

<sup>3</sup> vlastnost některých polovodičových materiálů, při které elektrický odpor závisí na velikosti mechanického tlaku, který na ně působí

<sup>4</sup> Polydimethylsiloxan

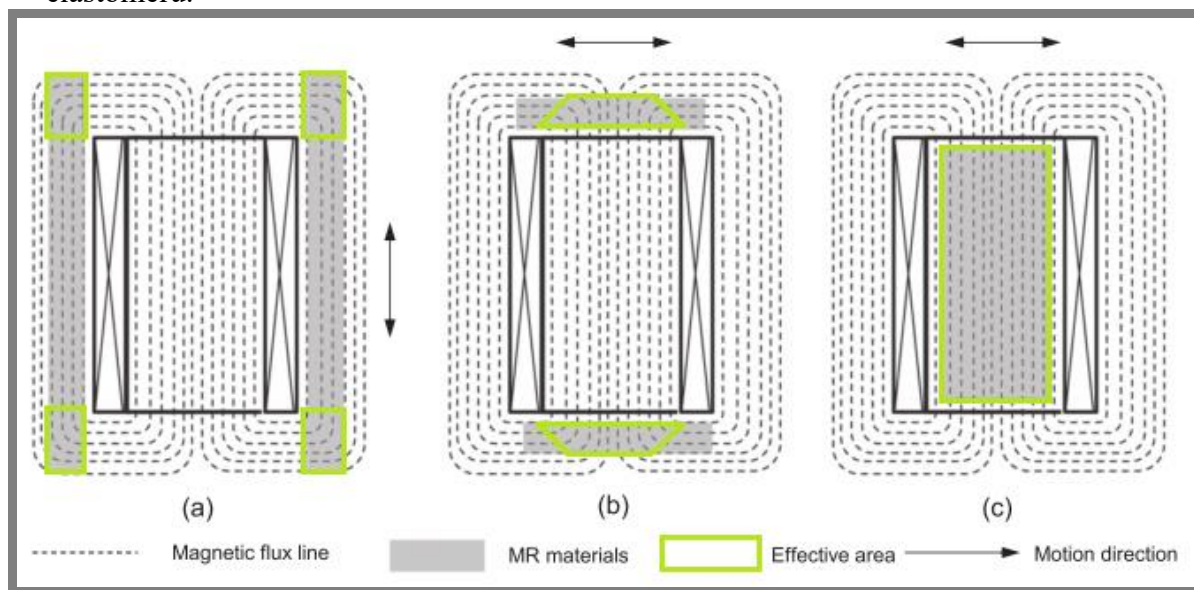
### 3.3.5 Možnosti regulace

Uspořádání částic uvnitř MR elastomerů má velký dopad na elastické a tlumicí vlastnosti. Ukázalo se, že dřívější předpoklady pro kubické uspořádání částic nejsou vhodné pro zlepšení strukturních vlastností. Uvnitř řetězců se totiž vyskytuje mnohem vyšší obsah efektivního plniva, než je jeho skutečný obsah. To je způsobeno uzavřením elastomeru mezi částice a třetí fází (elastomerový obal). Optimalizováním množství částic a jejich uspořádání jsme schopni zvětšit tuhost nebo tlumení při vystavení magnetickému poli.

Nejvýhodnější forma regulace je prostřednictvím magnetického pole. K zajištění takového pole se obvykle používají elektromagnetické cívky nebo solenoidy. Změnou elektrického proudu jsme schopni měnit magnetickou indukci probíhající v těchto materiálech. Pro maximalizování účinnosti magnetického efektu je nejvýhodnější kolmý směr magnetického toku vůči magnetickým částicím uvnitř matice. Nejefektivnější rozložení magnetického obvodu je do tvaru C. Plochy, kde se nachází MRE, jsou blízko u sebe a nastávají jen malé ztráty způsobené vedením magnetického pole vzduchem. Zároveň by takováto konstrukce měla být co možná nejmenší, proto její sestavení za pomoci různých komponentů může být obtíž.

Obecně jsou tři základní rozdělení pro sestavení magnetického obvodu, ty jsou vyobrazeny na Obr. 30. V případě (a) je MR materiál umístěn z venkovní strany cívky a směr pohybu je paralelní se směrem magnetického toku. Tato konfigurace není vhodná pro aplikace s MR elastomery, při nichž je vyžadováno mít co největší efektivní oblast. Proto se tato konfigurace používala spíše pro tlumiče s MR kapalinou, kde i malá efektivní oblast byla schopna provádět efektivní útlum tím, že znemožnila tok kapaliny. V konfiguraci (b) je MR materiál umístěn na spodní a vrchní ploše cívky, čímž zefektivníme magnetický tok. Nicméně opět jsme schopni využít jen malou část MR materiálu a tím vytvořit poměrně malé efektivní oblasti.

V konfiguraci (c) je MR materiál umístěn uvnitř cívky, kde je oproti vnějšku silné a jednotné magnetické pole. Při této konfiguraci pracuje MR materiál jako magnetické jádro. Tato konfigurace je vzhledem k aktivní oblasti nejvhodnější pro použití u MR elastomerů.



**Obr. 30** Konfigurace magnetických obvodů; čárkovaná čára – reprezentuje magnetický tok, šedé oblasti – indikují MR elastomer, zelené ohraničení – značí efektivní oblast fungování, šipky – představují směr pohybu magnetického zařízení [74]



Magnetické pole jsme také schopni ovlivňovat kombinací permanentních magnetů s elektromagnety. Přivedením kladného nebo záporného elektrického proudu můžeme zesílit nebo zeslabit již existující magnetické pole vytvořené permanentními magnety. Tato hybridně magnetická metoda zlepšuje nastavitelnost útlumu přírodní frekvence a tím zaručuje lepší provozuschopnost u strojů tohoto typu. Tlumení a tuhost můžeme nastavovat v průběhu zatížení. Pro zjištění změny přírodní frekvence magnetického pole můžeme použít relativní změnu modulu našeho zařízení dle rovnice (4).

$$\frac{\omega}{\omega_n} = \sqrt{1 + \frac{\Delta G}{G_0}} - 1 \quad (4)$$

Kde:

- $\Delta G$  - je modul při naměřeném magnetickém poli
- $G_0$  - původní modul, bez přítomnosti magnetického pole
- $\Delta G/G_0$  - relativní změna v nastavení modulu
- $\omega/\omega_n$  - odpovídající změna v přírodní frekvenci

Díky tomu, že se nastavení u MR materiálů projeví až při vysokých frekvencích, můžeme tyto materiály používat i pro utlumení zvuku a vibrací u velkorozměrových strojů, což je vhodné pro jejich kalibrování, a dále je můžeme využít i pro redukci oscilace budov, kde je kladen důraz na změnu vlastností ve velice malém časovém intervalu.

Hlavní účel tlumících přístrojů je útlum přírodní frekvence, která se dá popsat rovnicí (5).

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (5)$$

Kde:

- $K$   $N \cdot m^{-1}$  - je tuhost systému
- $M$   $kg$  - soustředěná hmota tlumeného objektu

Přidáním tlumiče s MR kapalinou bylo docíleno jen zhruba 2 % útlumu, což je v porovnání s MR elastomery nepatrný útlum. Výkon útlumu se u MR elastomerových zařízení zvýšil stanovením jejich statické frekvence, která souvisí s tuhostí materiálu. Při smykovém módu se tuhost dá charakterizovat dle rovnice (6).

$$K_s = \frac{GS}{nh} \quad (6)$$

Kde:

- $G$  - je smykový modul MR elastomeru
- $S$   $m^2$  - plocha řezu vrstvy MR elastomeru
- $h$   $m$  - tloušťka (výška) vrstvy MR elastomeru
- $n$  - počet vrstev MR elastomeru v zařízení

Pro tahově-tlakový mód lze tuhost popsat dle rovnice (7).

$$K_s = \frac{ES}{nh} \quad (7)$$

Kde:

E	-	- je modul stlačení MR elastomeru
S	m <sup>2</sup>	- plocha řezu vrstvy MR elastomeru
h	m	- tloušťka (výška) vrstvy MR elastomeru
n	-	- počet vrstev MR elastomeru v zařízení

Pro tlumení s jedním stupněm volnosti, jehož schéma je znázorněno na Obr. 31 a), lze vibrace přenesené do izolačního přístroje popsat jako přenos posunu a přenos síly, přenos posunu lze vyjádřit dle rovnice (8).

$$\frac{X}{Y} = \sqrt{\frac{1 + (2\vartheta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\vartheta r)^2}} \quad (8)$$

Kde:

X	m	- posunutí tlumeného zařízení
Y	m	- posunutí podstavce

r, lze vyjádřit rovnicí (9).

$$r = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (9)$$

Kde:

c	N·s/m	- je koeficient tlumení
m	kg	- hmotnost
$\omega_n$	rad/s	- přírodní frekvence

a frekvenční poměr je v rovnici (10).

$$\vartheta = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (10)$$

Kde:

$\omega$	rad/s	- kmitací frekvence systému
$\omega_n$	rad/s	- přírodní frekvence

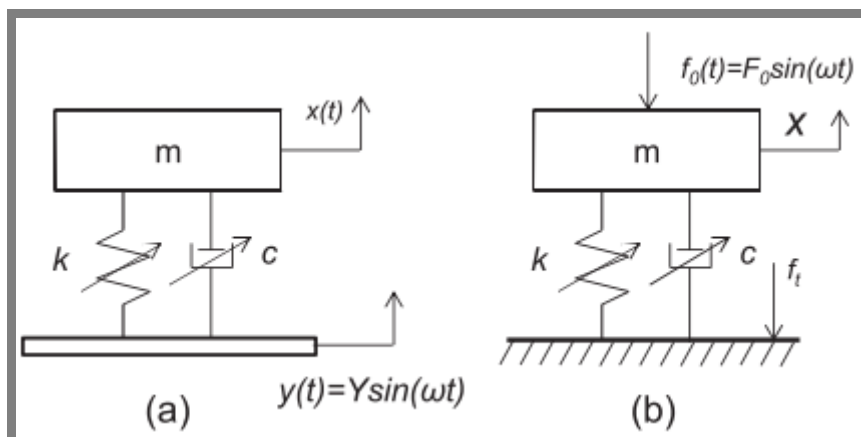


Pro systém na Obr. 31 b), který je navíc zatížený silou, platí rovnice (11).

$$\frac{F_T}{F_0} = \sqrt{\frac{1 + (2\vartheta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\vartheta r)^2}} \quad (11)$$

Kde:

$F_T$     N    - síla vyvolaná od podstavce  
 $F_0$     N    - síla vyvolaná na tlumené zařízení



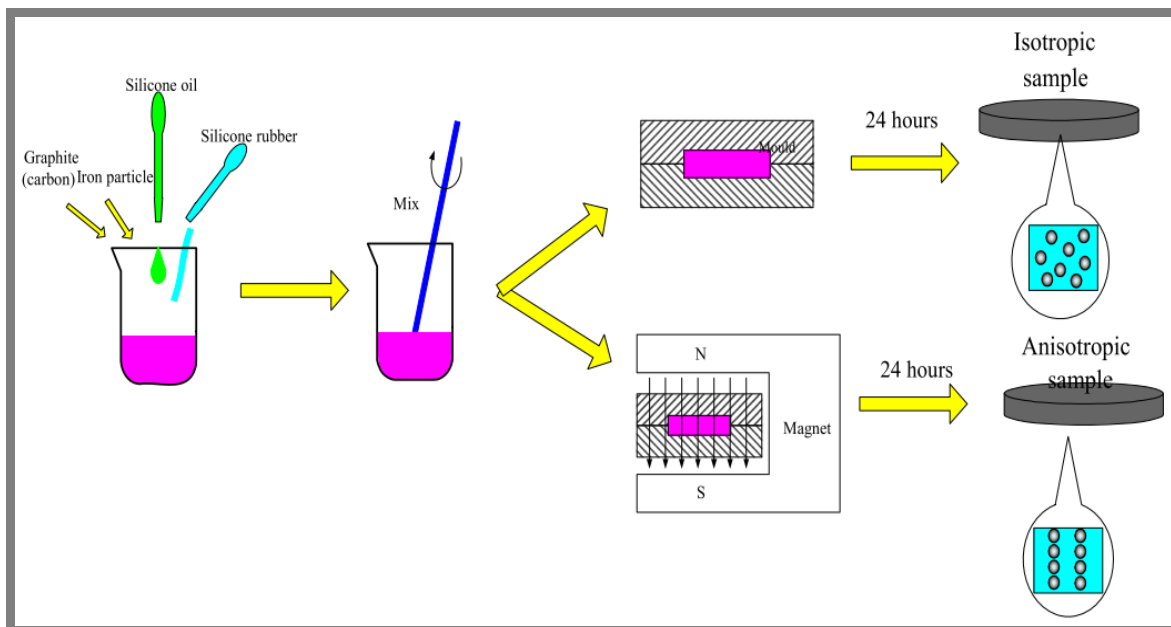
Obr. 31 Princip vibračních izolačních systémů, a) silově nezatížený systém, b) silově zatížený systém [74]

### 3.3.6 Výroba

3.3.6

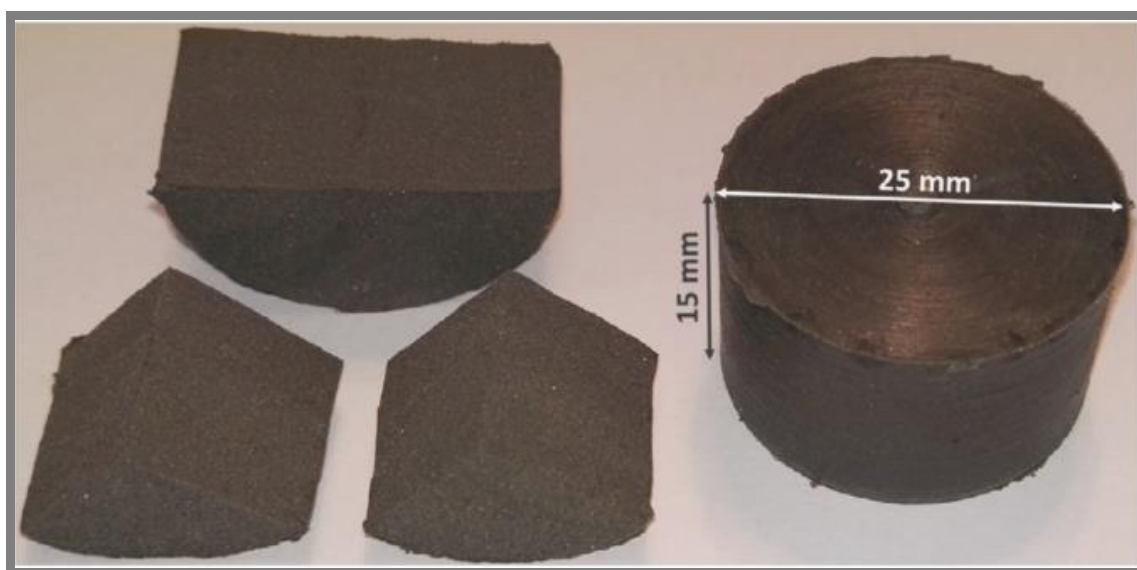
Způsob výroby je odlišný pro izotropní a pro anizotropní (seřazenou) strukturu MR elastomerů. Rozdíl ve výrobě je ve finálním odstátí materiálu, což je poslední proces výroby. Výroba začíná smícháním tří základních složek, což jsou: nosná struktura (silikonová guma, přírodní kaučuk, syntetický polymer), silikonový olej (nebo jiná aditiva) a železné částice. Přísady jsou důkladně promíchány, dokud nevznikne homogenní směs. Je nutné odstranit vzduchové bubliny uvnitř směsi umístěním směsi do vakuové komory [7, 26], nebo provedením teplotního ošetření [34]. Tyto způsoby ošetření zaručí udržení vysoké permeability a jednotnosti materiálu. Izotropní elastomer je odstaven bez přítomnosti magnetického pole, zatímco seřazený elastomer je odstaven za přítomnosti magnetického pole. K vytvoření seřazené struktury podél magnetických siločar je zapotřebí poměrně silné magnetické pole o velikosti většinou nad 0,8 T [5, 25, 34]. Konstantní teplota během odstavení, většinou nad 120°C, je také podmínkou pro udržení flexibility magnetických částic jak pro izotropní, tak anizotropní strukturu [5, 25]. Některé struktury lze nechat odstavit při pokojových teplotách [26]. Odstavením se magnetické částice uzamknou ve svých polohách. Po odstavení podstoupí struktura chemickou úpravu. Proběhne proces polymerizace [7], který zesílí křížové vazby uvnitř struktury a učiní ji tak více odolnou. Dále proběhne proces vulkanizace [34], který může trvat řádově od 1 hodiny [5, 25, 34] až po několik dní [26] v závislosti na druhu materiálu. Obecně platí, že měkčí materiál matice potřebuje více času na to, aby se stabilizoval. Proces výroby zachycuje Obr. 32.

Vulkanizací materiálu bude mít povrch méně lepkavý charakter a docílíme zvláštních mechanických vlastností pro strojírenské operace. Při některých operacích se s vulkanizací můžeme setkat již při odstavujícím procesu, což ještě více upevní sloupcovitou strukturu magnetických částic [31, 62].



Obr. 32 Proces výroby MR elastomerů, doba odstavení se může lišit [74]

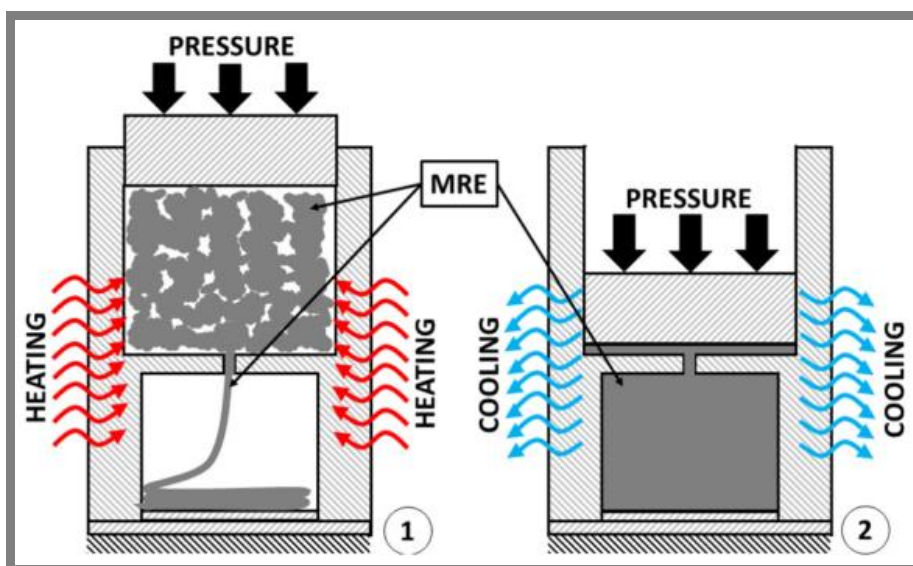
Kvůli předejití nechtěné aglomeraci, jak tomu bylo u MR kapalin, a pro lepší spojení mezi částicemi a maticí se magnetické částice podrobí speciální úpravě. Úprava před procesem odstavení odstraní povrchovou vlhkost a přidá částicím hydrofobní vlastnosti [32]. Pro úpravu vlastností se používá několik druhů aditiv, nejčastěji se však využívá silikonového oleje, který se využívá pro zvětšení mezer mezi částicemi a zmenší tak jejich možnost slepení. Mimo zvětšení plasticity a fluidity matice mohou rovnoměrně rozptýlit rozložení vnitřních sil uvnitř struktury, čímž se zvětší stabilita MR elastomerů [30].



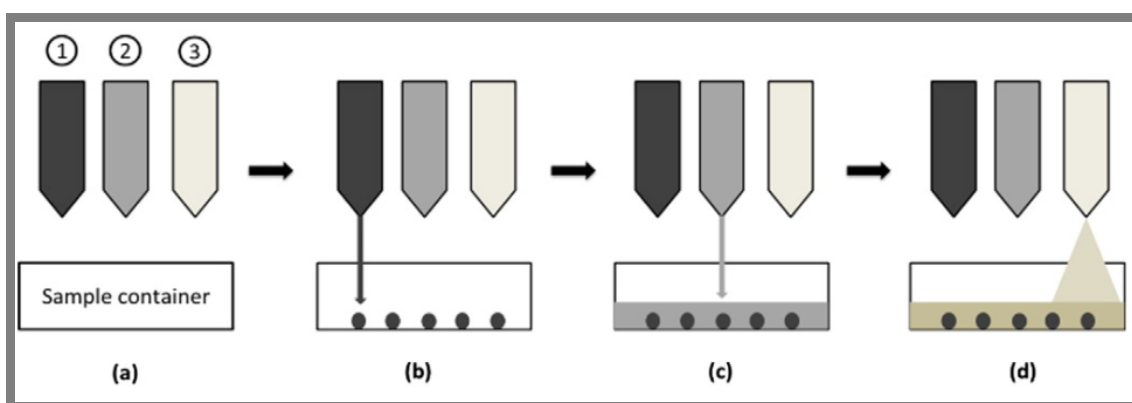
Obr. 33 Celý a rozřezaný vzorek vzniklý vytlačovacím lisováním [47]

Mezi nejnovější metody výroby patří vytlačovací lisování [35] a v poslední době se začínají vytvářet tzv. hybridní MR elastomery (H-MRE), jejichž výroba lze uskutečnit 3D tiskem [65].

Důkladné promíchání komponentů pro vytvoření homogenní struktury probíhá při výrobě vytlačovací metodou při teplotě 190°C. Poté, co směs vychladne, je rozřezána na menší kusy, jimiž se vyplní válcovitý prostor určený k lisování. V první fázi lisování se směs ohřeje na teplotu 200 °C a pod tlakem 9,81 MPa je malým otvorem vytlačována do zásobníku. Poté, co je materiál kompletně stlačen, se nechá vychladit při pokojové teplotě. Proces stlačení je patrný z Obr. 34. Po vychlazení je finální struktura zkontrolována kvůli vnitřním a vnějším vadám a je připravena k testování. Finální vzorek je na Obr. 33.



**Obr. 34** Proces vytlačovacího lisování 1) fáze zahřátí a stlačení, 2) fáze vytvrdnutí při pokojové teplotě [47]



**Obr. 35** 3D tisk H-MRE a) tři hlavice: 1) MRF filament 2) elastomerový filament 3) tryska pro UV světlo; b-d) postupný proces nanášení [77]

U 3D tisku H-MRE je použito třech hlavíc, z nichž jedna nanáší MR kapalinu, druhá vyplňuje mezery elastomerem a třetí upravuje strukturu ultrafialovým světlem. Proces výroby je na Obr. 35 a struktura je na Obr. 36. Takto vzniklé H-MRE vykazují lepší tlumicí vlastnosti, díky přítomnosti zapouzdřených vysoce viskózních MR kapalin. Přesné umístění MR kapalin v kontrolovaném množství mezi elastomerovou maticí umožňuje propojení těchto dvou materiálů, čímž vede k dalším možnostem jejich využití [65].



**Obr. 36** Struktura H-MRE, a) čistě elastomerový vzorek, b) vzorek s lineárním zastoupením MRF, c) vzorek s bodovým zastoupením MRF [77]

## 4 DISKUZE

Touto bakalářskou prací mělo být provedeno shrnutí dosavadních poznatků v oboru výzkumu magnetoreologických pěn a elastomerů. Zařízení z těchto materiálů se zatím nedočkala plně komerčního využití, a proto veškeré poznatky především přispívají ke zlepšení nově vznikajících testovacích systémů a prototypů.

Konkrétně byla představena struktura jak pěn, tak elastomerů. Můžeme říct, že u MRP se objevují menší částice o velikosti řádově jednotek až desítek  $\mu\text{m}$  sférického tvaru, zatímco u MRE se můžeme setkat s částicemi s velikostí až 100  $\mu\text{m}$  různých tvarů. Výroba je oproti jednoduchému smíchání třech hlavních komponent u MRK o něco složitější a časově náročnější. Při výrobě se setkáme s několika druhy chemických a termálních úprav, které vyžadují mimo jiné určitou dobu odstavení pro získání požadovaných vlastností materiálu a tím prodlouží i čas jejich výroby.

Použití nachází MRP hlavně v oblasti absorpce hluku, protože jsou schopny absorbovat zvuk v širokém frekvenčním spektru. Díky elegantnějšímu uchycení pěn v místech pro ovládání zařízení se začaly používat i v tlumičích nebo brzdových mechanismech, kde mohou nahradit použití přístrojů s MRK. Nejnověji se vyskytují jako dotykové sensory v lékařství pro operace prováděné roboty. Hlavní výhoda MRP a MRE spočívá v odstranění přebytečných součástí pro utěsnění kapaliny a zvětšení životnosti zařízení díky tomu, že jsou částice pevně uchyceny ve struktuře a tím nedochází k degradaci. MRE jsou využívány především jako tlumiče vibrací. Ty se mohou dělit na pohlcovače vibrací, vibrační izolátory a izolátory umístěné ve stojanech zařízení, ty se dále dělí na izolátory pro využití ve stavebnictví a strojírenství. MRE mají přirozenou tlumící vlastnost a jejich největší výhodou je jejich automatické nastavení tlumící frekvence. Pokud však frekvence vibrací přesahuje stanovenou mezi, může dojít k nesprávné funkci zařízení, a dokonce zvětšení vibrace celého systému. Jedna z velkých výhod je, že MRE mohou pracovat v systémech s několika stupni volnosti, zatímco zařízení z MRK mohla stěžít s jedním. Nejvhodnější regulace MRE a MRP je změnou velikosti magnetické indukce, která se mění v závislosti na velikosti elektrického proudu. Doba odezvy těchto materiálů bývá v řádu desítek milisekund. Dále se dají přístroje regulovat zavedením různých druhů magnetů, nebo využitím kombinace elektromagnetů a permanentních magnetů. Navíc je účinnost MR zařízení závislá na tvaru magnetického obvodu. Nejefektivnější je uspořádání do tvaru C, při kterém dochází k malým ztrátám magnetické indukce díky malé pracovní mezeře mezi póly magnetu. Zpravidla požadavek malých rozměrů zlepšuje výkon MR zařízení. Tento požadavek je ale poměrně těžce realizovatelný kvůli velkému počtu součástek různých velikostí, které jsou potřeba nainstalovat pro správnou funkci zařízení. Pro vyvolání maximálního MR efektu je vhodné, aby magnetické siločáry působili kolmo na vytvořené sloupcovité uspořádání částic ve struktuře MRE.

Pro výběr vhodného elastomeru pro útlum vibrací pračky můžeme vycházet z prací o vibračních izolátorech pro strojírenské použití [46, 55, 65]. Jelikož jsme u MRE schopni nastavovat tuhost materiálu, můžeme poměrně dobře tlumit vibrační frekvenci pračky podle rovnice (5). Celý útlum se dá vyjádřit jako posun tlumeného členu a tlumiče z rovnice (8). Vycházíme z modelu, že systém není zatížen vnější silou z Obr. 31. Elastomer by měl vyhovovat pro tlumení budících frekvencí v rozsahu alespoň do 100 Hz. Některé vhodné vzorky jsou uvedeny v Tabulka 3. Mají různé hodnoty útlumu, na základě jejich dynamické tuhosti. Podrobnější výsledky dynamické tuhosti by mohly být zjištěny v konkrétním testování.

---

## 5 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce poskytuje dosavadní přehled o magnetoreologických pěnách a elastomerech pro získání celkového nadhledu a usnadnění budoucího výzkumu na našich pracovištích.

V práci se povedlo seznámit čtenáře s nejdůležitějšími aspekty jejich struktury a rozdílnosti modelu chování u jednotlivých materiálů. Dále byly vysvětleny možnosti regulace a bylo zmíněno několik konkrétních hodnot, které se v současnosti pro regulaci využívají nejčastěji, nebo jsou dokonce nejvhodnější. S pokračujícím výzkumem ale mohou vznikat jiné způsoby ovládání, a tím se hodnota těchto parametrů může poněkud změnit. Byla představena možnost použití přístrojů s MR pěnami a elastomery v praxi, ovšem zatím nejsme svědky plně komerčního využití. Právě k této skutečnosti by mohlo dojít až po důkladnějším prozkoumání těchto materiálů. Většina závěrů byla porovnána s nedostatky předešlých systémů, které mohly být již v minulosti představeny s využitím jiných materiálů.

Obecně další výzkum MR elastomerů a pěn by mohl zahrnovat širší průzkum jejich pracovních frekvencí, zmenšení velikosti zařízení nebo zmenšení energetické náročnosti. Doposud je použití MR elastomerů omezeno především na tlumení a izolaci vibrací. Pokračujícím výzkumem můžeme očekávat výskyt MRE i v podobných aplikacích, jako tomu je u MR kapalin a pěn např. brzdící systémy nebo zařízení spojené se snímáním dotykových vjemů. Dále by měly být více prozkoumány nové operativní módy hlavně hybridního charakteru.



**6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] CARLSON, J.David a Mark R. JOLLY. MR fluid, foam and elastomer devices. *Mechatronics* [online]. 2000, roč. 10, č. 4–5, s. 555–569. ISSN 09574158. Dostupné z: doi:10.1016/S0957-4158(99)00064-1
- [2] SCARPA, Fabrizio L., William A. BULLOUGH a P LUMLEY. Trends in acoustic properties of iron particle seeded auxetic polyurethane foam. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* [online]. 2004, roč. 218, č. 2, s. 241–244. ISSN 0954-4062. Dostupné z: doi:10.1243/095440604322887099
- [3] ZIELINSKI, T. G. a M. RAK. Acoustic Absorption of Foams Coated with MR Fluid under the Influence of Magnetic Field. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 2010, roč. 21, č. 2, s. 125–131. ISSN 1045-389X. Dostupné z: doi:10.1177/1045389X09355017
- [4] KALLIO, M, T LINDROOS, S AALTO, E JÄRVINEN, T KÄRNÄ a T MEINANDER. Dynamic compression testing of a tunable spring element consisting of a magnetorheological elastomer. *Smart Materials and Structures* [online]. 2007, roč. 16, č. 2, s. 506–514. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/16/2/032
- [5] DENG, H X, X L GONG a L H WANG. Development of an adaptive tuned vibration absorber with magnetorheological elastomer. *Smart Materials and Structures* [online]. 2006, roč. 15, č. 5, s. N111–N116. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/15/5/N02
- [6] WATSON, J R. *Method and apparatus for varying the stiffness of a suspension bushing* [online]. B.m.: Google Patents. 1997. Dostupné z: <https://www.google.cz/patents/US5609353>. US Patent 5,609,353
- [7] KALLIO, Marke. *The elastic and damping properties of magnetorheological elastomers*. 2005. ISBN 9513863115.
- [8] BACHMAN, P a A MILECKI. MR haptic joystick in control of virtual servo drive. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2009, roč. 149, č. November, s. 12034 [vid. 2016-11-21]. ISSN 1742-6596. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/149/1/012034
- [9] CARLSON, J.David. Semi-Active Vibration Suppression - the Best from Active and Passive Technologies. 2007.
- [10] KARAKOC, Kerem. Design of a Magnetorheological Brake System Based on Magnetic Circuit Optimization Master of Applied Science. 2007.
- [11] YANG, G., B. F. SPENCER, J. D. CARLSON a M. K. SAIN. Large-scale MR fluid dampers: Modeling and dynamic performance considerations. *Engineering Structures* [online]. 2002, roč. 24, č. 3, s. 309–323. ISSN 01410296. Dostupné z: doi:10.1016/S0141-0296(01)00097-9
- [12] OLSON, Knobbe M Artens a Bear LLP. (19) United States (12). 2001, roč. 1, č. 60.
- [13] JOLLY, Mark R, Jonathan W BENDER a J David CARLSON. Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids [online]. nedatováno [vid. 2017-04-17]. Dostupné z: [http://services.eng.uts.edu.au/cempe/subjects\\_jgz/ems/ems\\_assignments](http://services.eng.uts.edu.au/cempe/subjects_jgz/ems/ems_assignments)

- /Ass\_8/MR.pdf
- [14] XUHUI LIU, XIAOLI GAO, FANG LI, HAO YU a DUN YE. Shear Performance of a Metal Foam Magnetorheological Fluid Damper. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2015, roč. 51, č. 1, s. 1–7. ISSN 0018-9464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2014.2343938
- [15] LIU, X.h, Z.m FU, X.y YAO a F LI. Performance of Magnetorheological Fluids Flowing Through Metal Foams. *Measurement Science Review* [online]. 2011, roč. 11, č. 5 [vid. 2017-04-22]. ISSN 1335-8871. Dostupné z: doi:10.2478/v10048-011-0028-8
- [16] YAO, Xing-Yan, Miao YU a Jie FU. Magnetic-enhanced normal force of magnetorheological fluids. *Smart Materials and Structures* [online]. 2015, roč. 24, č. 3, s. 35001 [vid. 2017-04-22]. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/24/3/035001
- [17] KIM, Soomin, Pyunghwa KIM, Chun-Yong PARK a Seung-Bok CHOI. A new tactile device using magneto-rheological sponge cells for medical applications: Experimental investigation. *Sensors & Actuators: A. Physical* [online]. 2016, roč. 239, s. 61–69 [vid. 2017-04-19]. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2016.01.016
- [18] SCHÜMMANN, M, S GÜNTHER a S ODENBACH. The effect of magnetic particles on pore size distribution in soft polyurethane foams. *Smart Materials and Structures* [online]. 2014, roč. 23, č. 7, s. 75011 [vid. 2017-04-19]. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/23/7/075011
- [19] DATA, Technical. MRF-132DG Magneto-Rheological Fluid. *Lord product selector guide: lord magnetorheological fluids* [online]. 2011, roč. 54, č. 2, s. 11 [vid. 2016-11-21]. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2016.01.016
- [20] DATA, Technical. MRF-140CG Magneto-Rheological Fluid. *Lord product selector guide: lord magnetorheological fluids* [online]. 2008, roč. 74, s. 5–6. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2016.01.016
- [21] DATA, Lord Technical. MRF-122EG Magneto-Rheological Fluid. *LORD corporation* [online]. 2008, roč. 48, s. 1–2. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2016.01.016
- [22] GINDER, John M., William F. SCHLOTTER a Mark E. NICHOLS. <title>Magnetorheological elastomers in tunable vibration absorbers</title>. In: Daniel J. INMAN, ed. [online]. B.m.: International Society for Optics and Photonics, 2001, s. 103–110 [vid. 2017-05-04]. Dostupné z: doi:10.1117/12.432694
- [23] CHEN, L, X L GONG a W H LI. Microstructures and viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers. *Smart Materials and Structures* [online]. 2007, roč. 16, č. 6, s. 2645–2650 [vid. 2017-05-04]. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/16/6/069
- [24] POPP, K. M., M. KROGER, W. h. LI, X. Z. ZHANG a P. B. KOSASIH. MRE Properties under Shear and Squeeze Modes and Applications. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 2010, roč. 21, č. 15, s. 1471–1477 [vid. 2017-05-04]. ISSN 1045-389X. Dostupné z: doi:10.1177/1045389X09355666



- [25] SHEN, Y., M. F. GOLNARAGHI a G. R. HEPPLER. Experimental Research and Modeling of Magnetorheological Elastomers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 2004, roč. 15, č. 1, s. 27–35 [vid. 2017-05-03]. ISSN 1045-389X. Dostupné z: doi:10.1177/1045389X04039264
- [26] TIAN, T. F., W. H. LI, G. ALICI, H. DU a Y. M. DENG. Microstructure and magnetorheology of graphite-based MR elastomers. *Rheologica Acta* [online]. 2011, roč. 50, č. 9–10, s. 825–836 [vid. 2017-05-03]. ISSN 0035-4511. Dostupné z: doi:10.1007/s00397-011-0567-9
- [27] LOKANDER, M a B STENBERG. Performance of isotropic magnetorheological rubber materials. *Polymer Testing* [online]. 2003, roč. 22, s. 245–251 [vid. 2017-05-03]. Dostupné z: doi:10.1016/S0142-9418(02)00043-0
- [28] RAY, S, A M SHANMUGHARAJ a A K BHOWMICK. A new parameter for interpretation of polymer-filler and filler-filler interactions in rubber vulcanizates. *Journal of Materials Science Letters* [online]. 2002, roč. 21, č. 14, s. 1097–1100. ISSN 1573-4811. Dostupné z: doi:10.1023/A:1016506532606
- [29] GINDER, J. M., S. M. CLARK, W. F. SCHLOTTER a M. E. NICHOLS. MAGNETOSTRICTIVE PHENOMENA IN MAGNETORHEOLOGICAL ELASTOMERS. *International Journal of Modern Physics B* [online]. 2002, roč. 16, č. 17n18, s. 2412–2418. ISSN 0217-9792. Dostupné z: doi:10.1142/S021797920201244X
- [30] LEBLANC, Jean L. Rubber<sup>±</sup>lller interactions and rheological properties in <sup>®</sup>lled compounds [online]. 2002 [vid. 2017-05-03]. Dostupné z: [http://ac.els-cdn.com/S0079670001000405/1-s2.0-S0079670001000405-main.pdf?\\_tid=d646035e-304a-11e7-bfbc-00000aabb0f27&acdnat=1493848543\\_5a15ae4ab594432c20f718dadac168acb](http://ac.els-cdn.com/S0079670001000405/1-s2.0-S0079670001000405-main.pdf?_tid=d646035e-304a-11e7-bfbc-00000aabb0f27&acdnat=1493848543_5a15ae4ab594432c20f718dadac168acb)
- [31] PADALKA, O., H. J. SONG, N. M. WERELEY, J. A. FILER II a R. C. BELL. Stiffness and Damping in Fe, Co, and Ni Nanowire-Based Magnetorheological Elastomeric Composites. *IEEE Transactions on Magnetism* [online]. 2010, roč. 46, č. 6, s. 2275–2277 [vid. 2017-05-03]. ISSN 0018-9464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2010.2044759
- [32] STEPANOV, GV, SS ABRAMCHUK, Da GRISHIN, LV NIKITIN, Eyu KRAMARENKO a Ar KHOKHLOV. Effect of a homogeneous magnetic field on the viscoelastic behavior of magnetic elastomers. *Polymer* [online]. 2007, roč. 48, č. 2, s. 488–495 [vid. 2017-05-03]. ISSN 00323861. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymer.2006.11.044
- [33] KUKLA, Mateusz, Jan GÓRECKI, Ireneusz MALUJDA, Krzysztof TALAŚKA a Paweł TARKOWSKI. The determination of mechanical properties of magnetorheological elastomers (MREs). *Procedia Engineering* [online]. 2017, roč. 177, s. 324–330 [vid. 2017-05-01]. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2017.02.233
- [34] LIAO, G. J., X-L GONG, S. H. XUAN, C. J. KANG a L. H. ZONG. Development of a real-time tunable stiffness and damping vibration isolator based on magnetorheological elastomer. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 2012, roč. 23, č. 1, s. 25–33 [vid. 2017-05-03]. ISSN 1045-389X. Dostupné z: doi:10.1177/1045389X11429853

- [35] BOCIAN, Mirosław, Jerzy KALETA, Daniel LEWANDOWSKI a Michał PRZYBYLSKI. Tunable Absorption System based on magnetorheological elastomers and Halbach array: design and testing [online]. 2017 [vid. 2017-05-01]. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmmm.2017.03.071
- [36] HOANG, N, N ZHANG a H DU. A dynamic absorber with a soft magnetorheological elastomer for powertrain vibration suppression. *Smart Materials and Structures* [online]. 2009, roč. 18, č. 7, s. 74009 [vid. 2017-05-04]. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/18/7/074009
- [37] KIM, Young-Keun, Hyo-In BAE, Jeong-Hoi KOO, Kyung-Soo KIM a Soohyun KIM. Real time control of a tunable vibration absorber based on magnetorheological elastomer for suppressing tonal vibrations. *Review of Scientific Instruments* [online]. 2012, roč. 83, č. 4, s. 46108 [vid. 2017-05-04]. ISSN 0034-6748. Dostupné z: doi:10.1063/1.4704455
- [38] LADIPO, Ismail L, J.D. FADLY a Waleed F FARIS. Characterization of Magnetorheological Elastomer (MRE) Engine Mounts. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2016, roč. 3, č. 2, s. 411–418 [vid. 2017-05-04]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2016.01.029
- [39] BALASOIU, Maria a Ioan BICA. Composite magnetorheological elastomers as dielectrics for plane capacitors: Effects of magnetic field intensity [online]. 2016 [vid. 2017-05-04]. Dostupné z: doi:10.1016/j.rinp.2016.04.006
- [40] LI, Yancheng, Jianchun LI, Tongfei TIAN a Weihua LI. A highly adjustable magnetorheological elastomer base isolator for applications of real-time adaptive control. *Smart Materials and Structures* [online]. 2013, roč. 22, č. 9, s. 95020 [vid. 2017-05-04]. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/22/9/095020
- [41] XU, Zhenbang, Xinglong GONG, Guojiang LIAO a Xianmin CHEN. An Active-damping-compensated Magnetorheological Elastomer Adaptive Tuned Vibration Absorber. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 2010, roč. 21, č. 10, s. 1039–1047 [vid. 2017-05-04]. ISSN 1045-389X. Dostupné z: doi:10.1177/1045389X10375485
- [42] KAVLICOGLU, Barkan, Bryce WALLIS, Huseyin SAHIN a Yanming LIU. Magnetorheological elastomer mount for shock and vibration isolation. In: Mehrdad N. GHASEMI-NEJHAD, ed. [online]. B.m.: International Society for Optics and Photonics, 2011, s. 79770Y [vid. 2017-05-04]. Dostupné z: doi:10.1117/12.881870
- [43] OPIE, S. a W. YIM. Design and Control of a Real-Time Variable Modulus Vibration Isolator. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 2011, roč. 22, č. 2, s. 113–125 [vid. 2017-05-04]. ISSN 1045-389X. Dostupné z: doi:10.1177/1045389X10389204
- [44] NAYAK, B, S K DWIVEDY a K S R K MURTHY. Dynamic analysis of magnetorheological elastomer-based sandwich beam with conductive skins under various boundary conditions. *Journal of Sound and Vibration* [online]. 2011, roč. 330, s. 1837–1859 [vid. 2017-05-04]. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsv.2010.10.041
- [45] HU, Guoliang, Miao GUO, Weihua LI, Haiping DU a Gursel ALICI. Experimental

- investigation of the vibration characteristics of a magnetorheological elastomer sandwich beam under non-homogeneous small magnetic fields. *Smart Materials and Structures* [online]. 2011, roč. 20, č. 12, s. 127001 [vid. 2017-05-04]. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/20/12/127001
- [46] ZHANG, X.Z. a W.H. LI. Adaptive tuned dynamic vibration absorbers working with MR elastomers. *Smart Structures and Systems* [online]. 2009, roč. 5, č. 5, s. 517–529 [vid. 2017-05-04]. ISSN 1738-1584. Dostupné z: doi:10.12989/sss.2009.5.5.517
- [47] DENG, H.X. a X.L. GONG. Adaptive Tuned Vibration Absorber based on Magnetorheological Elastomer. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 2007, roč. 18, č. 12, s. 1205–1210 [vid. 2017-05-04]. ISSN 1045-389X. Dostupné z: doi:10.1177/1045389X07083128
- [48] SUN, S S, Y CHEN, J YANG, T F TIAN, H X DENG, W H LI, H DU a G ALICI. The development of an adaptive tuned magnetorheological elastomer absorber working in squeeze mode. *Smart Materials and Structures* [online]. 2014, roč. 23, č. 7, s. 75009 [vid. 2017-05-04]. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/23/7/075009
- [49] NI, Z.C., X.L. GONG, J.F. LI a L. CHEN. Study on a Dynamic Stiffness-tuning Absorber with Squeeze-strain Enhanced Magnetorheological Elastomer. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 2009, roč. 20, č. 10, s. 1195–1202 [vid. 2017-05-04]. ISSN 1045-389X. Dostupné z: doi:10.1177/1045389X09104790
- [50] DU, Haiping, Weihua LI a Nong ZHANG. Semi-active variable stiffness vibration control of vehicle seat suspension using an MR elastomer isolator. *Smart Materials and Structures* [online]. 2011, roč. 20, č. 10, s. 105003 [vid. 2017-05-05]. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/20/10/105003
- [51] JEONG, Un-Chang, Ji-Hyun YOON, In-Hyung YANG, Jae-Eun JEONG, Jin-Su KIM, Kyung-Ho CHUNG a Jae-Eung OH. Magnetorheological elastomer with stiffness-variable characteristics based on induced current applied to differential mount of vehicles. *Smart Materials and Structures* [online]. 2013, roč. 22, č. 11, s. 115007 [vid. 2017-05-05]. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/22/11/115007
- [52] KOMATSUZAKI, Toshihiko, Toshio INOUE a Osamu TERASHIMA. Broadband vibration control of a structure by using a magnetorheological elastomer-based tune d dynamic absorber. *Mechatronics* [online]. 2016, roč. 40, s. 128–136 [vid. 2017-05-04]. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechatronics.2016.09.006
- [53] MIKHAILOV, Valery P. a Alexey M. BAZINENKOV. Active vibration isolation platform on base of magnetorheological elastomers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* [online]. 2017, roč. 431, s. 266–268 [vid. 2017-05-05]. ISSN 03048853. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmmm.2016.10.007
- [54] LI, Weihua, Kosta KOSTIDIS, Xianzhou ZHANG a Yang ZHOU. Development of a force sensor working with MR elastomers. *IEEE/ASME International*

- Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM* [online]. 2009, s. 233–238. Dostupné z: doi:10.1109/AIM.2009.5230010
- [55] BICA, Ioan. Magnetoresistor sensor with magnetorheological elastomers. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* [online]. 2010, roč. 17, s. 83–89 [vid. 2017-05-05]. Dostupné z: doi:10.1016/j.jiec.2010.12.001
- [56] BÖSE, Holger, Raman RABINDRANATH a Johannes EHRLICH. Soft magnetorheological elastomers as new actuators for valves. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 2012, roč. 23, č. 9, s. 989–994 [vid. 2017-05-05]. ISSN 1045-389X. Dostupné z: doi:10.1177/1045389X11433498
- [57] BENÍČEK, Bc. Josef. Mechanické chování laminátových struktur při nízkocyklovém namáhání [online]. 2008 [vid. 2017-05-02]. Dostupné z: [https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/7300/beniček\\_2008\\_dp.pdf?sequence=1](https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/7300/beniček_2008_dp.pdf?sequence=1)
- [58] LOKANDER, M a B STENBERG. Performance of isotropic magnetorheological rubber materials. *Polymer Testing* [online]. 2003, roč. 22, č. 3, s. 245–251 [vid. 2017-05-01]. ISSN 01429418. Dostupné z: doi:10.1016/S0142-9418(02)00043-0
- [59] POPP, K. M., M. KROGER, W. h. LI, X. Z. ZHANG a P. B. KOSASIH. MRE Properties under Shear and Squeeze Modes and Applications. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 2010, roč. 21, č. 15, s. 1471–1477 [vid. 2017-05-03]. ISSN 1045-389X. Dostupné z: doi:10.1177/1045389X09355666
- [60] GOODS, S. H., C. L. NEUSCHWANGER, L. L. WHINNERY a W. D. NIX. Mechanical properties of a particle-strengthened polyurethane foam. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 1999, roč. 74, č. 11, s. 2724–2736. ISSN 0021-8995. Dostupné z: doi:10.1002/(SICI)1097-4628(19991209)74:11<2724::AID-APP20>3.0.CO;2-1
- [61] CHRISTENSEN, R. M. a M. P. RAO. Mechanics of composite materials, R. M. Christensen, Wiley-Interscience, New York, 1979, 348 pp. *Journal of Polymer Science: Polymer Letters Edition* [online]. 1980, roč. 18, č. 10, s. 688–688 [vid. 2017-05-02]. ISSN 03606384. Dostupné z: doi:10.1002/pol.1980.130181009
- [62] LI, Yancheng, Jianchun LI, Weihua LI a Haiping DU. A state-of-the-art review on magnetorheological elastomer devices. *Smart Materials and Structures* [online]. 2014, roč. 23, č. 12, s. 123001 [vid. 2017-05-03]. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/23/12/123001
- [63] BÖSE, Holger, Raman RABINDRANATH a Johannes EHRLICH. Soft magnetorheological elastomers as new actuators for valves. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 2012, roč. 23, č. 9, s. 989–994 [vid. 2017-05-04]. ISSN 1045-389X. Dostupné z: doi:10.1177/1045389X11433498
- [64] MARTIN, James E., Robert A. ANDERSON, Judy ODINEK, Douglas ADOLF a Jennifer WILLIAMSON. Controlling percolation in field-structured particle composites: Observations of giant thermoresistance, piezoresistance, and

- chemiresistance. *Physical Review B* [online]. 2003, roč. 67, č. 9, s. 94207 [vid. 2017-05-04]. ISSN 0163-1829. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRevB.67.094207
- [65] BASTOLA, A.K., V.T. HOANG a L LI. A novel hybrid magnetorheological elastomer developed by 3D printing. *Materials & Design* [online]. 2017, roč. 114, s. 391–397 [vid. 2017-05-03]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2016.11.006

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

### 7.1 Seznam použitých symbolů a veličin

$\eta$	[Pa·s]	- dynamický viskozita
$D$		- gradient rychlosti
$\tau$	[Pa·s]	- tečné napětí
$\gamma$		- smykový spád
$x'$		- velikostní parametr
$n$		- parametr tvaru
$\Delta G$		- modul při naměřeném magnetickém poli
$G_0$		- původní modul, bez přítomnosti magnetického pole
$\Delta G/G_0$		- relativní změna v nastavení modulu
$\omega/\omega_n$		- odpovídající změna v přírodní frekvenci
$K$	[N·m <sup>-1</sup> ]	- tuhost systému
$M$	[kg]	- soustředěná hmota tlumeného objektu
$G$		- smykový modul MR elastomeru
$S$	[m <sup>2</sup> ]	- plocha řezu vrstvy MR elastomeru
$h$	[m]	- tloušťka (výška) vrstvy MR elastomeru
$n$		- počet vrstev MR elastomeru v zařízení
$E$		- modul stlačení MR elastomeru
$X$	[m]	- posunutí tlumeného zařízení
$Y$	[m]	- posunutí podstavce
$C$	[N·s/m]	- koeficient tlumení
$m$	[kg]	- hmotnost
$\omega_n$	[rad/s]	- přírodní frekvence
$\omega$	[rad/s]	- kmitací frekvence systému
$F_T$	[N]	- síla vyvolaná od podstavce
$F_0$	[N]	- síla vyvolaná na tlumené zařízení

### 7.2 Seznam použitých zkratk

MR	magnetoreologický
MRK	magnetoreologická kapalina
MRP	magnetoreologická pěna
MRE	magnetoreologický elastomer
PU	polyuretan
TVA	tuned vibration absorber
DVA	dynamic vibration absorber
ATVA	active tuned vibration absorber
SDOF	single degree of freedom
PDMS	Polydimethylsiloxan
H-MRE	hybrid magnetorheological elastomer
hm%	hmotnostně-procentuální zastoupení

**8 SEZNAM OBRÁZKŮ**

<b>Obr. 1</b> Vliv toku na uspořádání částic	14
<b>Obr. 2</b> Tokové a viskózní charakteristiky	15
<b>Obr. 3</b> Zformování plniva	16
<b>Obr. 4</b> Základní operativní módy MR kapalin	17
<b>Obr. 5</b> Nízkonákladové MR pěnové zařízení	18
<b>Obr. 6</b> Schéma MR tlumiče s kovovou pěnou a MR kapalinou	19
<b>Obr. 7</b> Ukázka nenasáklých pěn	19
<b>Obr. 8</b> Vzorek pěny (0,29 g/cm <sup>3</sup> ) obsahující 30 hm % částic Al	20
<b>Obr. 9</b> 3D rekonstrukce tří sousedních dutin	21
<b>Obr. 10</b> Struktura kovových pěn	22
<b>Obr. 11</b> Princip fungování MR kovových pěn	23
<b>Obr. 12</b> Porovnání v útlumu hluku standartní pěny s nasáklou a suchou pěnou	23
<b>Obr. 13</b> Akustická absorpce polyuretanových pěn	24
<b>Obr. 14</b> Závislost změny intenzity magnetického pole na zvětšujícím se proudu	25
<b>Obr. 15</b> Závislost tlumicí síly na proudu	25
<b>Obr. 16</b> Závislost tlumicí síly na smykovém spádu	25
<b>Obr. 17</b> MR elastomerový TVA navržen výzkumnou laboratoří Ford	27
<b>Obr. 18</b> Kompaktní MR elastomerový ATVA	28
<b>Obr. 19</b> Dvojitě dipolární Halbachovo uspořádání	28
<b>Obr. 20</b> Schéma MR elastomerového izolátoru vibrací pro automobilová sedadla	29
<b>Obr. 21</b> Fotografie a schéma široko-frekvenčního tlumicího zařízení	30
<b>Obr. 22</b> Kontrolovatelný ventil, deskový tlumič s MRE jako částí jádra	30
<b>Obr. 23</b> Homogenní struktura vzniklá tlakovým vytlačováním	32
<b>Obr. 24</b> Struktura MR elastomerů s 30 hm% železa	32
<b>Obr. 25</b> Základní operativní módy MR elastomerů	34
<b>Obr. 26</b> Výsledky při statickém zatížení	35
<b>Obr. 27</b> Výsledky pro různé magnetické intenzity při cyklickém zatížení	35
<b>Obr. 28</b> Původní modul v závislosti na budící frekvenci a síle magnetického pole	36
<b>Obr. 29</b> Pokles modulu v závislosti na frekvenci a síle magnetického pole	36
<b>Obr. 30</b> Konfigurace magnetických obvodu	38
<b>Obr. 31</b> Princip vibračních izolačních systémů	41
<b>Obr. 32</b> Proces výroby MR elastomerů	42
<b>Obr. 33</b> Celý a rozřezaný vzorek vzniklý vytlačovacím lisováním	42
<b>Obr. 34</b> Proces vytlačovacího lisování	43
<b>Obr. 35</b> 3D tisk H-MRE	43
<b>Obr. 36</b> Struktura H-MRE	44



---

## **9 SEZNAM TABULEK**

<b>Tabulka 1</b> Typické vlastnosti MR kapalin	17
<b>Tabulka 2</b> Komerčně dostupné MR kapaliny	26
<b>Tabulka 3</b> Porovnání zjištěných dat výzkumu doposud	37